

## Математическая модель поведения породугольного массива при газификации угольных пластов

Фальштынский В.С., Дычковский Р.Е., Светкина Е.Ю., Лозинский В.Г.

*Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина*

Механизм поведения породного массива при газификации угольного пласта во многом похожий с процессами, которые сопровождают очистные вынимание угля при шахтной разработке. Поэтому целесообразно провести исследование напряженно деформированного состояния пород вокруг подземного газогенератора на основе закономерностей сдвига породугольного массива в условиях шахтной разработки.

Вопросы образования полостей расслоения в породугольном массиве на контактах породных слоев при их подработке нашли освещение в работах ученых И.М. Печука, Л.В. Савенко, С.Г. Авершина, М.А. Иофиса, П.Я. Середнякова, А.В. Савостьянова, А.И. Зорина, М.П. Зборщика и других, а также А. Лабасса, Я. Штюффкена (Голландия), Н. Вебера, Д. Форстмана, К. Паттейского (Германия) и др.

Образование полостей расслоения большинством авторов рассматривается как следствие сдвига горных пород при разработке пластов. Выполненные исследования носят в основном описательный характер, количественная и качественная зависимость характера воображения сдвига породных слоев с учетом горнотехнического фактора и времени мало изучена и требует уточнения [1, 2].

В исследованиях деформаций пород горного массива, где способы расчета базируются на гипотезах или статистических данных, используется ряд гипотез, которые связывают опускание дневной поверхности с пределами очистного вынимания через углы разрушения пород. Эти углы и сдвиг дневной поверхности основываются на натуральных исследованиях. При этом методе расчета основное внимание уделено расчетам деформации опусканий дневной поверхности. Геомеханические процессы и их динамика в толще пород горного массива не рассматриваются [3].

Математическая модель напряженно деформированного состояния массива горных пород основывается на теории пластичности, упругости и предельного равновесия. Породоугольный массив представляется в виде сплошной среды, сдвиг пород в нем происходит без нарушения целостности массива. Очистные выработки представляются в виде щелей [2, 3]. Как предельные условия в определенных случаях используются шахтные исследования сдвига породугольного массива или поверхности, а также предельные углы сдвига. Неоднородность слоистого породного массива, сложный математический аппарат теории пластичности и упругости дают приближенное описание поведения горного массива при ведении очистных работ [33, 34]. Моделирование сплошного слоистого горного массива не дает возможность учитывать горно-геологические факторы, например, прочность пород, мощность породных слоев, расположения в толще горного массива, трещиноватость и тому подобное.

Математическая модель напряженно деформированного состояния пород, которая основывается на теории упругости, целостности и однородности породного массива, учитывает особенности сдвига слоистого массива осадочных пород при разработке угольного пласта в шахтных условиях. Однако этот метод предусматривает использование сложного матема-

тического аппарата, а для определения предельных условий необходимо использовать ряд трудоемких шахтных измерений параметров сдвига породных слоев. Результаты расчетов приемлемы лишь для условий, где проводились натурные исследования. При этом не охватываются все сдвиги пород горного массива. Также не есть согласование его с горно-технологическими параметрами, такими как скорость подвигания очистного забоя, длина лавы и выработанного пространства, способ управления кровлей, ширина вынимания угля и скорость комбайна и тому подобное [3, 4].

Преимуществом этого метода является учет в расчетах особенностей расслоения породного массива на контактах наслоения с образованием полостей расслоения, неравномерности распределения нагрузок в породных слоях, динамики поведения породной толщи, нагрузок нависшей массы пород и сдвига породных пластов.

Методы расчета параметров опорного давления впереди очистного забоя сводятся к определению ширины опорной зоны и величины напряжений в ней, на уровне разрабатываемого пласта, не связывая расчет параметров опорной зоны с массивом поддельных пород [5]. Данный метод базируется на теории упругости и представлений о породном массиве как о сплошной среде, которая воспринимает дополнительную нагрузку массы от подработанных пород, объем которых связывается с углами полного сдвига. Описание области предельного состояния пласта и определяющее расположение максимума напряжений требует шахтных измерений на уровне пласта.

В математических моделях, где в основу расчета положена гипотеза тонких плит и балок, процесс сдвига горных пород рассматривается в виде последовательного изгиба слоев с проскальзыванием на контактах напластування в пределах свободного пролета, не задевая зону опорного давления. Расчет сводится к решению отдельных задач для определения нарушения целостности пород на контуре выработки, шага посадки кровли, необходимой несущей способности крепления, с учетом влияния мощности пласта, способа управления кровлей, распространения нормальных нагрузок на породный слой в зависимости от геологического строения, скорости подвигания забоя и пространственного изменения породных пластов относительно друг к другу [3, 5, 6].

Вышеописанные методы расчета напряженно деформированного состояния пород полностью не учитывают особенности строения породной толщи и технологические параметры отработки угольного пласта, который не дает полную комплексную, качественную и количественную характеристику протекания геомеханических процессов в массиве горных пород. Большинство приведенных выше методов расчета дают возможность решать отдельные прикладные задачи, например, конвергенции боковых пород, нагрузки на механизированное крепление, шагу посадки кровли и тому подобное.

Применение в данной работе метода расчета напряженно деформированного состояния пород, разработанного в НГУ профессором А.В. Савостьяновим, позволит определить геомеханические параметры, связанные с поведением породного массива при газификации угольного пласта.

Для использования этого метода расчета поведения породного массива при подземной газификации угля следует учесть особенности пород непосредственной кровли и подошвы, склонных под действием высоких температур к спучиванию, заполнению выгазованного пространства золошлаками и особенности выгазовывания угольного пласта по мощности [7,8].

Принятая математическая модель позволяет нам рассматривать породугольную толщу как слои пород литологической разницы в виде балки-полосы с жестким защемлением. Основным видом разрушений целостности при поперечном изгибе, в условиях подработки - расслоения, вызванные изгибистым моментом (рис 1а,б).

Нагрузка от массы, приделанной надугольной толщии распределяется за породными слоями неравномерно: в опорной зоне находится максимум, а над выгазованным пространством параметры нагрузок зависят от собственного смежного слоя.

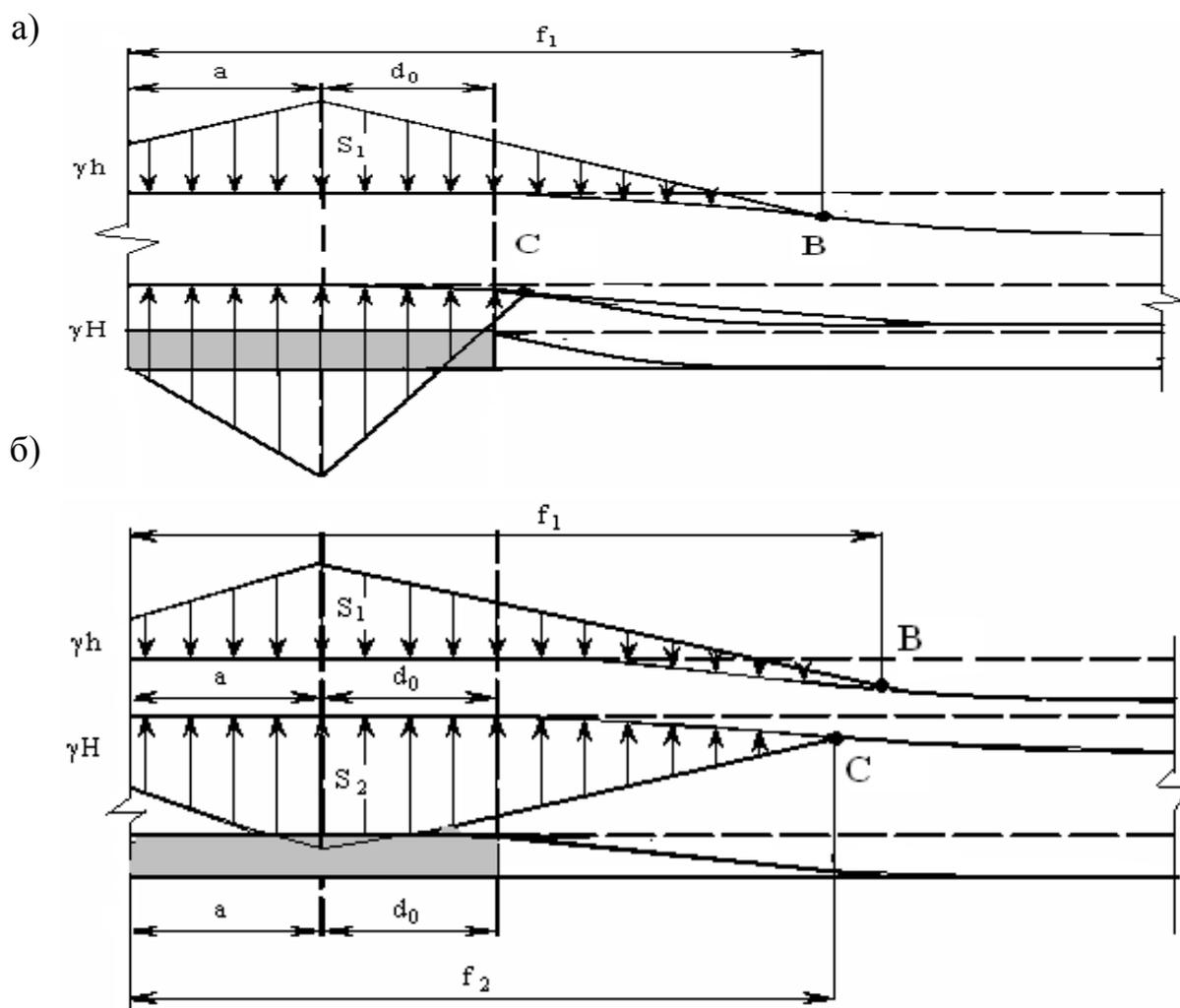


Рис. 1а,б. Характер распределения нормальных нагрузок и реакций в двух смежных разножестких слоях пород: а - твердость нижнего слоя ниже от твердости верхнего, б - твердость нижнего слоя больше твердости верхнего

Характер распределения нормальных нагрузок и реакций в двух смежных разножестких слоях пород показан на рис. 1 а, б, при этом нижний слой пород имеет небольшую твердость (рис. 1а). Для этих слоев около границы подземного газогенератора образуется полость. Расслоение и нагрузка над этой полостью, со стороны выше лежащих слоев, отсутствует. Относительно верхнего слоя пород граница реакции ( $f_2$ ) распространяется к полости, то есть к точке, где изгибистый момент нижнего породного слоя меняет знак. Со стороны опорной зоны нагрузки на верхний слой распространяется к точке, в которой кривизна изгиба породного слоя меняет знак (точка В, абсцисса  $f_1$ ) (рис 1а). Точка 3 является границей опорной зоны, ее местонахождения может изменяться. Опускание породного слоя впоследствии приводит к сдвигу данной точки к массиву, где момент меняет знак.

Точка изменения которая не меняет знак момента, называется «физической», а точка, где кривизна изгиба породного слоя меняет знак - «геометрической».

Разножесткие породные слои показаны на рисунку 1б, при этом опускание верхнего и нижнего слоев одинаковые. Нагрузка на ниже лежащий породный слой, со стороны верхнего, распределяется равномерно, полость расслоения между ними отсутствует. В этом случае принимаем линейный закон распределения реакций и нагрузок между точками для рассмотренного слоя пород. Зная массу свисающих над массивом пород, можно получить физические эпюры нагрузок в этих точках.

Для реальных производственных факторов местонахождения данных точек необходимо рассчитать выходя из определения поперечных сил ( $Q_x$ ), изгибистых моментов ( $M_x$ ), углов поворота поперечных перерезов в породном слое ( $\theta_x$ ), и их опусканий ( $Y_x$ ).

Как расчетную схема принимаем полу-бесконечную балку-полосу, пригруженным выше лежащим слоем пород, с целью определения геометрических параметров опорной зоны:

$$a = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} - (2\beta l + 1) - d_0, \text{ м}; \quad d = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{\beta l}{\beta l + 1}, \text{ м},$$

где  $l$  – предельный полупролет, м.

Существуют зависимости между поперечными силами, нагрузкой, углом поворота пересечений, изгибистым моментом и опусканиями:

$$Q = \frac{dM}{dx}; \quad q = \frac{dQ}{dx}; \quad \theta = \frac{dy}{dx}; \quad M_x = \frac{dQ}{Eydx}.$$

При известных предельных условиях за одним из этих выражений можно получить результаты за другими. Расположенные между точками эпюры нагрузок интегрируются за участками, с последующей аппроксимацией рядов Фурье за синусами:

$$Q_x = \sum_1^k B_k \sin \frac{k\pi}{L} x,$$

где  $L$  – длина полного полупролета ( $L = d + d_0 + 1$ );

$B_k$  – коэффициент зависящей от параметров эпюры нагрузок,  $T$  [1]; в расчетах принимается три коэффициента  $B_1, B_2$  и  $B_3$ , то есть  $K = 1, 2, 3$ .

На основании связей (3.2) и предельных условий получено;

$$M_x = 0,16L \sum_1^k \frac{B_k}{k} \left( \cos \frac{k\pi}{L} x + \sin \frac{k\pi}{L} x - 1 \right);$$

$$Q_x = 0,6 \frac{L^3}{F(k)h^3 \cdot K_b} \sum_1^k \frac{B_k}{k^2} \sin \left( \frac{k\pi}{L} x \right),$$

$$y_x = 0,4 \frac{L^3}{F(k)h^3 K_b} \sum_1^k \frac{B_k}{k^3} \cos \left( \frac{k\pi}{L} x - 1 \right),$$

где  $K_b$  – коэффициент спучивания пород;

$h$  – мощность породного слоя кровли, м

$F(k)$  – модуль деформации пород, которая изменяется по длине породного слоя при переходе из опорной зоны над выгазованным пространством и определяется за выражением:

$$F_k = E_0, \text{ при } 0 < x < a$$

$$F(k) = (E_0 - E_n) \frac{f_2 - x}{d_0} + E_n, \text{ при } a < x < f_2;$$

$$F(k) = E_n, \text{ при } f_2 < x < L.$$

При условии распределения в опорной зоне нормальных нагрузок и реакций за линейным законом максимальная нагрузка при свободном опускании породного слоя определяется из выражений:

$$S_1 = \frac{(2 \cdot \sum h \cdot k_\epsilon (l_{np} \cdot \mathcal{E} + a + d_0) - g \cdot h \cdot k_\epsilon)}{(a + \epsilon_1)};$$

$$S_1 = \frac{(2 \cdot \sum H \cdot (l_{np} \cdot \mathcal{E} + a + d_0) - g \cdot H_a - S_n \cdot d)}{(a + v_2)},$$

где  $l_{np}$  – длина предельного полупролета породного слоя, м;

$\mathcal{E}$  – коэффициент, который учитывает распределение опорной нагрузки по периметре подземного газогенератора;

$v_2 = d_0$  – для первого слоя пород, м;

$S_n = 0$  – для выше лежащих породных слоев.

В пределах длины предельного полупролета масса приделанных пород распределяется над отработанным пространством [1]. Масса пород при условии  $l_n > l_{np}$  распределяется над выгазованным пространством в пределах разницы полупролетов ( $l_n - l_{np}$ ) (рис. 2.2).

Распределение границы пригруженной на породный слой со стороны выше лежащей толщи к геометрической точке перегиба данного слоя и абсциссы ( $f_1$ ) равняется  $0,63L_{пр}$ . Граница реакций относительно данного слоя зависит от твердости ниже лежащего слоя. Если твердость выше лежащего больше твердости ниже лежащего слоя, абсцисса этой границы ( $f_1$ ) определяется за выражением:

$$f_1 = (0,5 - 0,05 \frac{B_{2k}}{B_{1k}}) \cdot L_{пр}.$$

В случае, когда твердость выше лежащего слоя равняется или меньше твердости ниже лежащего, граница реакции касательно выше лежащего слоя пород распределяется к геометрической точке перегиба ниже лежащего слоя  $f_1 = 0,63L_{пр}$ .

Основой выходных данных для выполнения аналитических исследований является стратиграфический разрез и горно-технологические параметры. Породную толщу, которая вмещает газогенератор, разделяют на слои за литологической разницей с нумерацией от угольного пласта, который газифицируется, к дневной поверхности. Расчет выполняется в два этапа [1, 7, 8].

Первый этап обуславливается определением снизу наверх геометрических параметров эпюр нагрузок ( $a, d_0, f_1, f_2, l_{np}, l_p$ ). Предельными условиями в этом случае являются величины свободных опусканий породного слоя, при которых над выгазованным пространством отсутствует реакция, и на опорную зону передается масса от приделанных пород. Когда максимальные опускания отвечают заданным, геометрические параметры отвечают установленным параметрам.

Эпюры нагрузок физических параметров определяются от дневной поверхности к пласту, что выгазовывается. Предельные условия обуславливаются максимальными величинами опусканий породных слоев. Для упрощения задания в подробленном породном массиве выделяются точки породных слоев, в основе которых заложены более твердые слои, которые влияют на параметры сдвига (рис. 1). На основании предложенной математической модели разработан алгоритм расчета параметров расслоения породной толщи с учетом особенностей процесса газификации угольного пласта, который отображен в блок-схеме (рис. 2). Построения графиков и эпюр

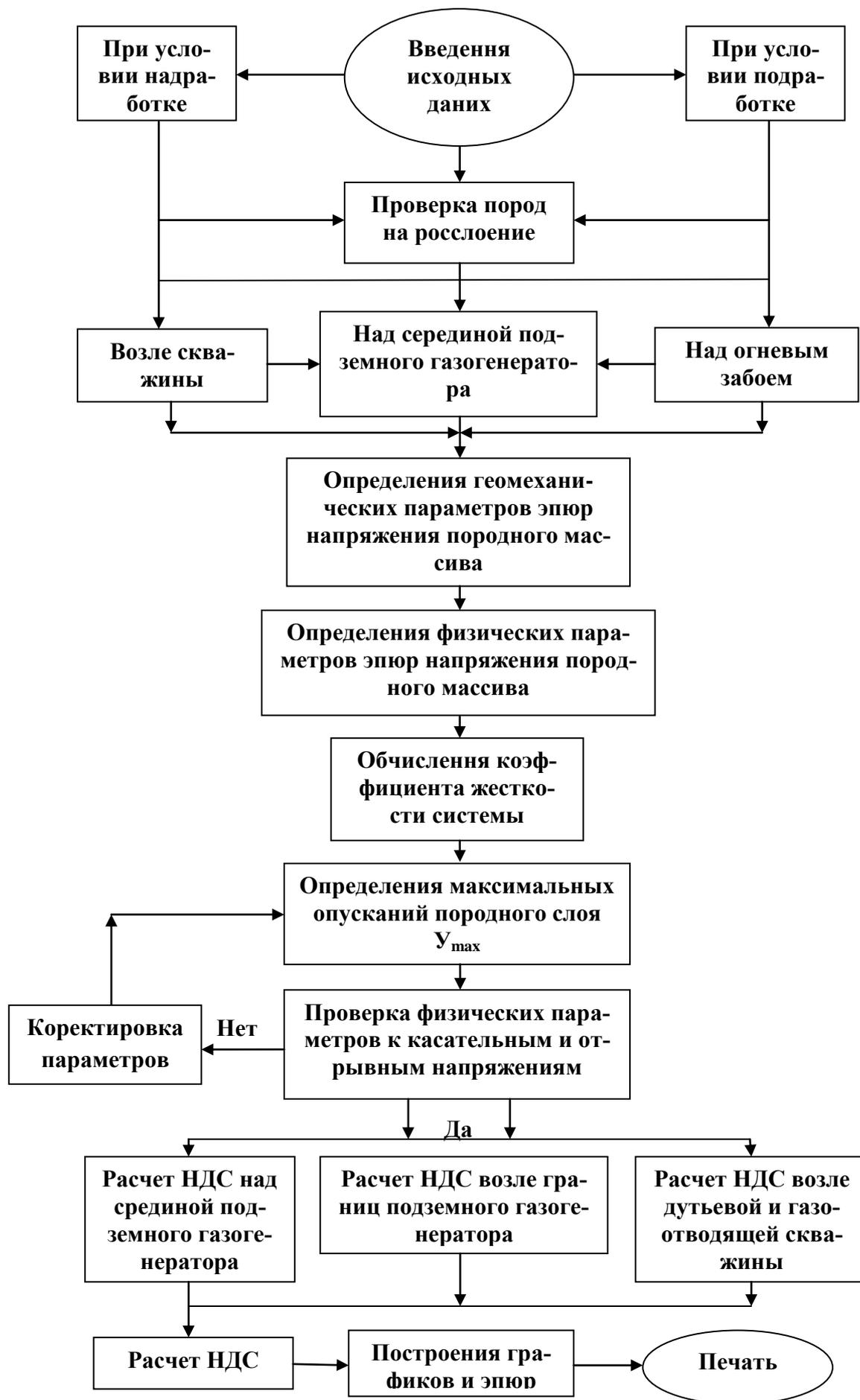


Рис. 2. Блок-схема расчета параметров расслоения породной толщи при выгазовывании угольного пласта

Алгоритм расчета физических параметров эпюр нагрузок разработан в комплексной программе языком «Паскаль» для ПЭВМ и включает 17 блоков, которые предусматривают решение следующих заданий:

1. Обработка геометрических параметров, установления предельных условий, которые определяют закономерность распределения нормальных нагрузок.
2. Установление закономерности распределения нормальных нагрузок на уровне первого слоя.
3. Установление распределения реакций относительно первого слоя.
- 4, 5. Установление распределения нормальных нагрузок и реакций следующих слоев с учетом реакции касательно выше лежащих слоев.
6. Вычисление коэффициента  $B_k$  с учетом особенностей распределения нормальных нагрузок и реакций.
- 7, 8, 9. Контроль выполнения предельных условий, переадресация на корректировку физических параметров.
- 10, 11, 12, 13. Определение реактивного момента, корректировки физических параметров эпюр в зависимости от их типа.
- 14, 15. Определение поведения пород основной кровли при критическом и нормальном состоянии.
16. Определение параметров полостей расслоения над газогенератором.
17. Обработка результатов расчетов, вывод материалов на экран или на печать.

Программой предусмотрен блок, который осуществляет проверку породных слоев на расслоение. Критерием проверки являются касательные и отрывные напряжения, вызванные поперечными силами  $Q$ , изгибным моментом и собственным весом пород, которые определяются из выражений:

$$G_{om} = \frac{\gamma \cdot h_{cl} \cdot l}{(l - h_{cl} \cdot tg \iota)}; G_{01} = B_{1k} \cdot \left( \frac{7,2}{L} + 0,1 \cdot \frac{L}{h_{cl}^2} \right);$$

$$\tau_{np} = \frac{1,5 \cdot Q}{h_{cl}},$$

где  $l$  – длина полупролета подземного газогенератора, м;  $tg \iota$  – угол разрушения пород;  $L$  – длина полного полупролета, м;  $B_{1k}$  – коэффициент, который зависит от параметров эпюры нагрузки, т.

При условии, что прочность пород на отрыв перпендикулярна наслоению  $G_{om} > R_{om}$  или прочность пород на скалывание параллельная наслоению  $\tau_{изг} > R_{ск}$ , – наблюдается расслоение породной толщи.

Одновременно с определением мест расслоения пород в подработанном массиве, в балке определяется мощность пачки, которая отслаивается. Расчетом устанавливается количество породных слоев после расслоения и осуществляются расчеты в заданных сечениях.

Программой рассматриваются сечения (рис. 3.): над серединой подземного газогенератора (сечение А-А), расположенное перпендикулярно к огневому забою; на соединении генератора со скважинами, дутьевой и газоотводной (сечение Б-Б), расположенное параллельно к огневому забою. Сечения отличаются один от другого закономерностями распределения нормальных нагрузок, при этом скорость подвигания огневого забоя учитывается по бою, время в сечении А-А принимается равным  $T = 0,5 > L < l_r$  ( $l_r$  – полупролет газогенератора), а в пересечении Б-Б –  $T = \frac{S}{V}$  ( $S$  – расстояние от данного сечения к огневому забою).

В сечении В-В, которое располагается за забоем, время  $T$  учитывается по окончании выгазовывания угольного пласта в этом сечении. Изменение модуля деформации пород над выгазованным пространством ( $E_{nt}$ ) и коэффициента  $\beta$  в расчетах зависит от времени и скорости подвигания огневого забоя.

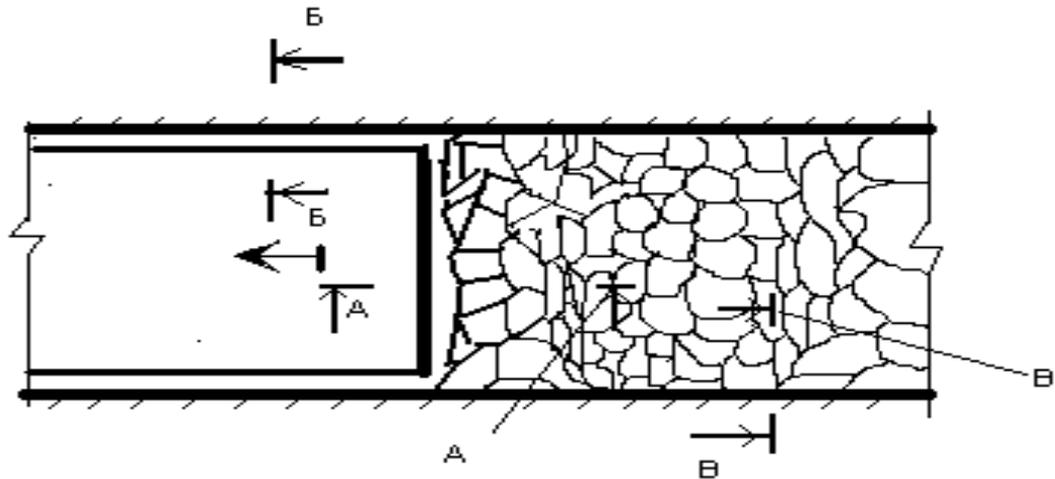


Рис. 3. Пересечение для расчета НДС пород, вмещающие подземный газогенератор

Граница опорной зоны породного слоя на уровне его кровли обуславливается «геометрической точкой» перегиба и ее абсцисса ( $f_1$ ) отвечает золотой пропорции от полного полупролета, то есть

$$f_1 = 0,63 \cdot (l_{np} + a + d_0).$$

Граница опорной зоны верхнего слоя смещается по отношению к границе нижнего слоя в сторону выработанного пространства на величину, которая зависит от мощности породного слоя и угла поворота вертикальных сечений. При этом выполняется условие:

$$b_1(L) - d_0 = 1,03 \cdot (b_1(L-1) - d_0 \cdot (L-1));$$

После определения геометрических параметров в направлении от дневной поверхности к угольному слою устанавливаются физические параметры. Выделяются твердые породные слои, которые определяют процесс движения. В дальнейшем определяются параметры распределения реакций и нормальных нагрузок в пачке породных слоев. Потом вычисляются коэффициенты ( $B_1, B_2, B_3$ ), которые зависят от параметров эпюр и находятся из выражения:

$$B_k = \frac{2L}{\kappa^2 \pi^2} \left[ (R_1 - R_2) \sin \frac{\kappa \pi}{L} a S_n \sin \frac{\kappa \pi}{L} f_2 + \frac{l}{\kappa \pi} \left[ \frac{R_1 - R_2}{a} - \frac{S_1 - Tn_1 - z_1}{b_1} + \frac{S_2 - Sn - Tn - Z_2}{b_2} \right] \cos \frac{\kappa \pi}{L} a + \right. \\ \left. + \frac{S_2 - Sn - Tn - Z_2}{b_2} x \cos \frac{\kappa \pi}{L} f_2 + \frac{S_1 - Tn_1 - Z_1}{b_1} \cos \frac{\kappa \pi}{L} f_1 - \frac{T_1 - Z_1}{d_1} \cos \frac{\kappa \pi}{L} f_1 - \frac{T_2 - Z_2}{d_2} \cos \frac{\kappa \pi}{L} \mu_2 - \right. \\ \left. - \left( \frac{T_1 - Z_1}{d_1} - \frac{T_2 - Z_2}{d_2} \right) (-1)^k + \frac{R_2 - R_1}{a} \right].$$

После определения коэффициента, включается блок, который вычисляет максимальные опускания, которые сравнятся с максимально возможными.

Если расчетные опускания ( $U_p$ ) несравнимы с предельными, то в блоке программы производится корректировка параметров эпюр нагрузок.

При поперечном изгибе породного слоя нейтральная ось смещается в сторону большего модуля, потому нужно в расчетах напряжений, которые возникают при изгибистом моменте, применять приведенный модуль деформаций ( $E_{II}$ ). Коэффициент ( $E_H$ ), который обуславливает сдвиг нейтральной оси и приведен модуль ( $E_{II}$ ), определяются из выражений:

$$E_{II} = \frac{4E_{сж} \cdot E_p}{\left(\sqrt{E_p} + \sqrt{E_{сж}}\right)} ;$$

$$E_H = \frac{\sqrt{E_p}}{\sqrt{E_p} + \sqrt{E_{сж}}}$$

где  $E_p, E_{сж}$  – модули деформации пород на растягивание и сжатия.

При СПГУ породы непосредственной кровли у огневого забоя подземного газогенератора подвергаются высоким температурам [7, 8]. Величина температур газификации угольного слоя изменяется по длине реакционного канала. Максимальные температуры (1100-1300 °С) наблюдается на границе перехода окислительной зоны в восстановительную зону. Поэтому породы у огневого забоя поддаются разным термоупругим напряжениям. Такая же ситуация наблюдается и у выгазованном пространстве.

При влиянии высоких температур в ходе лабораторных и стендовых исследований установлено изменение плотности горных пород под воздействием высокотемпературного прогрева. В результате исследований наблюдается увеличение объема пород на 1-5% от первобытного, при этом модуль упругости изменяется на 5-20% [7]. В результате термодинамических нагрузок, с повышением температур, будет изменяться за линейным законом модуль упругости  $E$  (рис. 4).

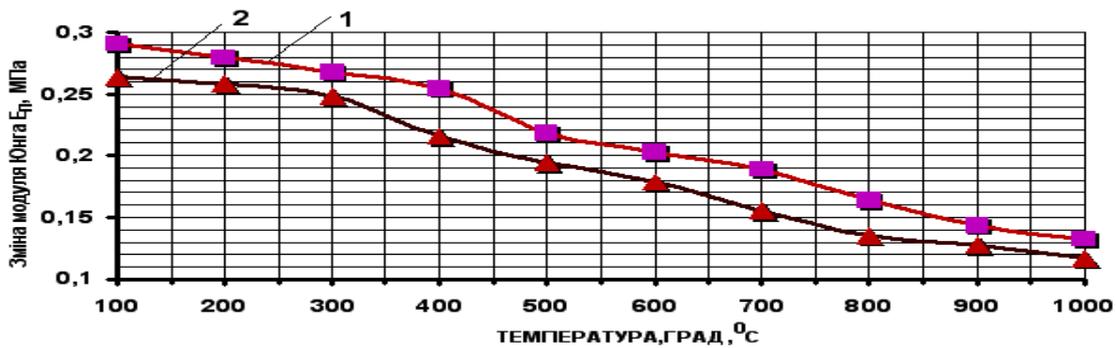


Рис. 4. Изменение модуля деформации  $E_n$  в зависимости от степени прогрева пород: 1- пещаный сланец (при  $T = 1200^{\circ}C$ ,  $E_n = 0,119$  МПа), 2-глинистый сланец (при  $T = 1200^{\circ}C$ ,  $E_n = 0,112$  МПа)

В последующих расчетах напряженно деформированного состояния нижней породной пачки непосредственной кровли стоит учитывать изменения модуля упругости. Коэффициент упругости будет изменяться с учетом коэффициента температурного влияния  $K_T = 1, 05-1,2$ .

Причинами разрушения породного слоя являются нормальные нагрузки, силы трения, изгибистый момент и касательные напряжения от поперечных сил.

Напряжения от изгибистого момента ( $G$ ), сил трения ( $t_{mp}$ ) и касательные от поперечных сил ( $\tau_{изг}$ ) определяют из выражений:

$$G_{сж} = \frac{12 \cdot E_0 \cdot M_x}{E_n \cdot K_T h^3} \cdot m_H \cdot y; (0 < y < m_H \cdot h); \quad G_p = \frac{12 \cdot E_0 \cdot M_x}{E_n \cdot K_T h^3} \cdot (1 - m_H) \cdot y; (0 < y < (1 - m_H) \cdot h);$$

$$S = \frac{(S_2 - S_n) \cdot (a + d_0 - x)}{a + d_0} + S_n;$$

При  $a < x < (a + d_0)$        $S = \frac{S_2 \cdot x}{a}$ .

$$\text{При } 0 < x < a \quad t_{mp} = \frac{\Delta x \cdot S}{a + d_0}; \quad t_{узз} = 1,5 \cdot \frac{a \cdot x}{K_T h}.$$

Суммарные напряжения ( $G$ ) определяются с учетом напряжений вызванных распором. Напряжения со знаком (-) сжимающие, а со знаком (+) – растягивающие.

$$G_y = S + (\Delta G_{сж} \cdot G_p); \quad G_x = \Delta S + (G_{сж} \cdot G); \quad \tau_{xy} = t_{mp}$$

Состояние пород определяется за главными напряжениями ( $G_1 G_2$ ) и за критерием сопротивления пород одноосевому сжатию ( $SPR$ )

$$G_1 \cdot G_2 = \frac{G_x + G_y}{2} \pm \sqrt{(G_x - G_y)^2 - 4\tau_{xy}^2}; \quad \tau_{max} = \frac{G_1 - G_2}{2};$$

$$SPR = \frac{1}{2x} [ \sqrt{[1 - \psi] \cdot (G_1 - G_2)^2 + \psi \cdot (G_1 + G_2)^2} - (1 - \psi) \cdot (G_1 - G_2) ].$$

Условия разрушения породы кровли проверяются за:  $SPR > R_{сж}$  и  $\tau_{max} > R_{сж}$ .

Поперечные силы над серединой подземного газогенератора отсутствуют, нормальные нагрузки незначительны, а состояние пород массива зависит от изгибистого момента, который вызывает напряжение за наслоением ( $\lambda G_{сж}, \lambda G_p$ ) и перпендикулярно ему ( $G_{сж}, G_p$ ).

За счет собственного веса и от изгибистого момента в породном слое возникают напряжения на отрыв перпендикулярно наслоению.

В соответствии с принятой физической моделью и расчетной схемой, определяются напряжения в разных сечениях породного слоя, поперечные силы  $Q_x$  и изгибистый момент  $M_x$  из выражений:

$$Q_x = B_{1k} \cdot \sin \frac{\pi}{L} x + B_{1k} \cdot \sin \frac{2\pi}{L} x;$$

$$M_x = 0,16 \cdot L \cdot [ B_{1k} \cdot (\cos \frac{\pi}{L} x + \sin \frac{\pi}{L} x - 1) + \frac{B_{2k}}{2} \cdot (\cos \frac{2\pi}{L} x + \sin \frac{2\pi}{L} x - 1) ].$$

Образование вертикальных трещин определяется за деформациями пород через горизонтальные перемещения  $N_x$  рассчитанные для двух смежных сечений за выражениями:

$$N_x = 1,2 \cdot \frac{L^2}{K_T h_{сл} \cdot f(k)} \cdot \left( B_{1k} \cdot \sin \frac{\pi}{L} x + \frac{B_{2k}}{4} \cdot \sin \frac{2\pi}{L} x \right);$$

$$\xi = \frac{(N_2 - N_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot 1000.$$

Опускание породного слоя  $Y_x$  определяются из выражения:

$$Y_x = 0,4 \cdot \frac{L^3}{K_T h_{сл}^3 \cdot F(k)} \cdot [ B_{1k} \cdot (\cos \frac{\pi}{L} x - 1) + \frac{B_{2k}}{8} \cdot (\cos \frac{2\pi}{L} x - 1) ].$$

Натурными измерениями сдвигов установлено, что при деформации  $\varepsilon > 5$  мм/м наблюдается образование вертикальных трещин в породных слоях массива [1].

Основными видами нарушения целостности пород, которые обуславливают поведение массива есть расслоение по ослабленным контактам за счет отрыва под действием собственного веса или изгибистого момента над серединой газогенератора. Прочность пород на отрыв нормально к наслоению зависит от глубины разработки, наличие в породах на полостях наслоения ослабленных контактов и прослоек. Определяется коэффициентом  $DR$

$$DR = (B - \Gamma \cdot H \cdot 10^{-6})$$

где  $B$  и  $\Gamma$  – коэффициенты, которые зависят от литологической разницы пород, Мпа. Зная характер распределения нагрузок на слои, определяем пространственные параметры полостей расслоения.

От огневого забоя полость расслоения будет защелкиваться, в итоге образуются две полости, которые примыкают к выгазованному пространству и к массиву (рис. 5).

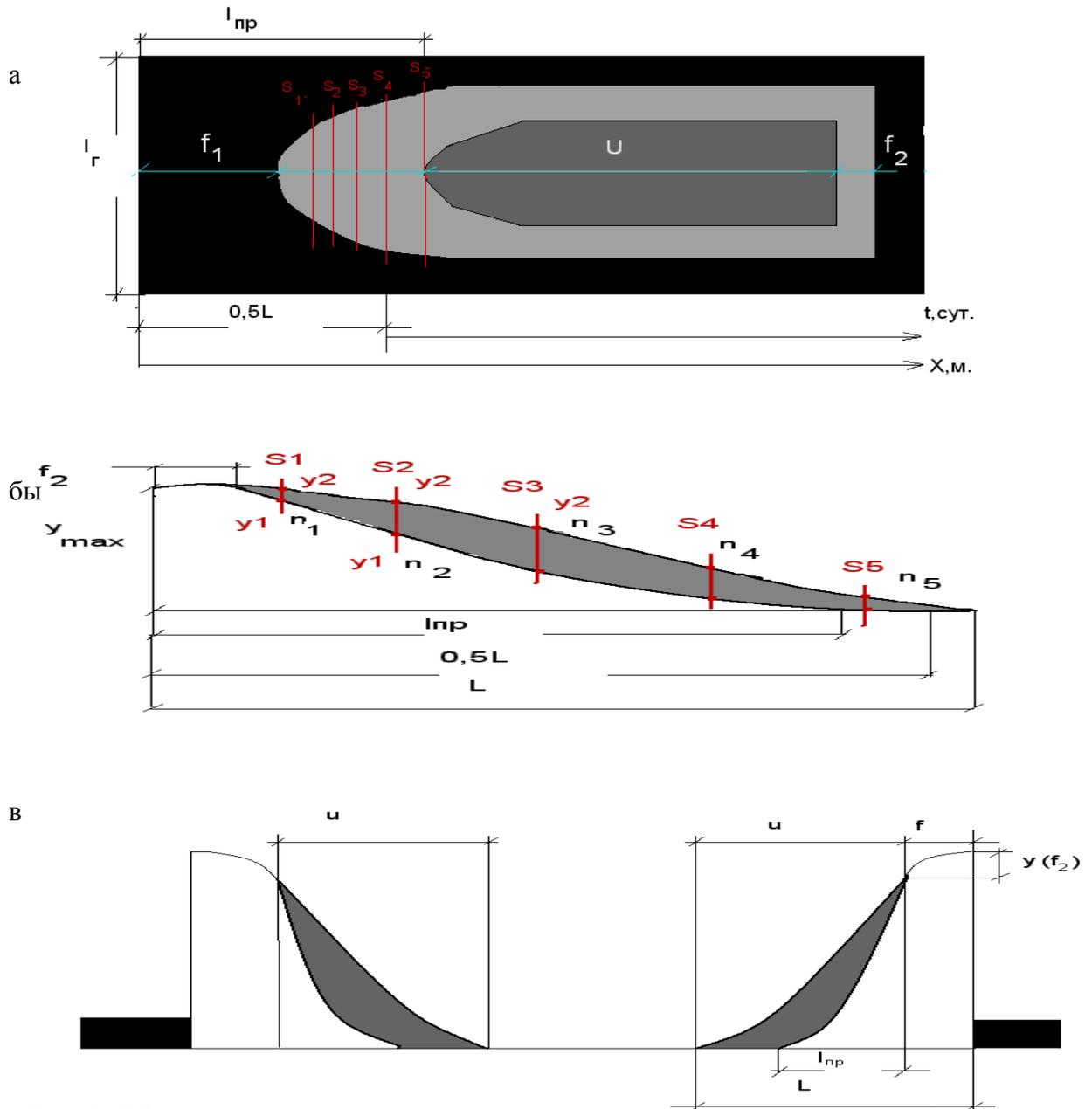


Рис. 5. Образование двух полостей расслоения при смыкании полости над серединой выгазованного пространства: а – условия формирования полости расслоения над газогенератором в динамике (сечения  $S_1$ - $S_5$ ); б – закрыта полость с параметрами зоны защемления и размеров полости в сечениях  $S_1$ - $S_5$ ; в – формирование двух полостей при закрытии полости в сечении  $S_5$

Ширина полостей  $u'$  определяется за выражением:

$$u' = L - f_2,$$

где  $L$  – предельный полупролет породы-моста, м;  $f_2$  – ширина опорной зоны на уровне почвы породы моста, м.

Определяем площадь полости расслоения, выходя из рассмотренных сечений  $S_{I-1}$ -  $S_5$ , при  $l \leq y_{max}$

$$S_n = n_b \cdot u_n \cdot \frac{1}{2}.$$

На рис. 6, показаны параметры формирования закрытой и открытой полостей расслоения.

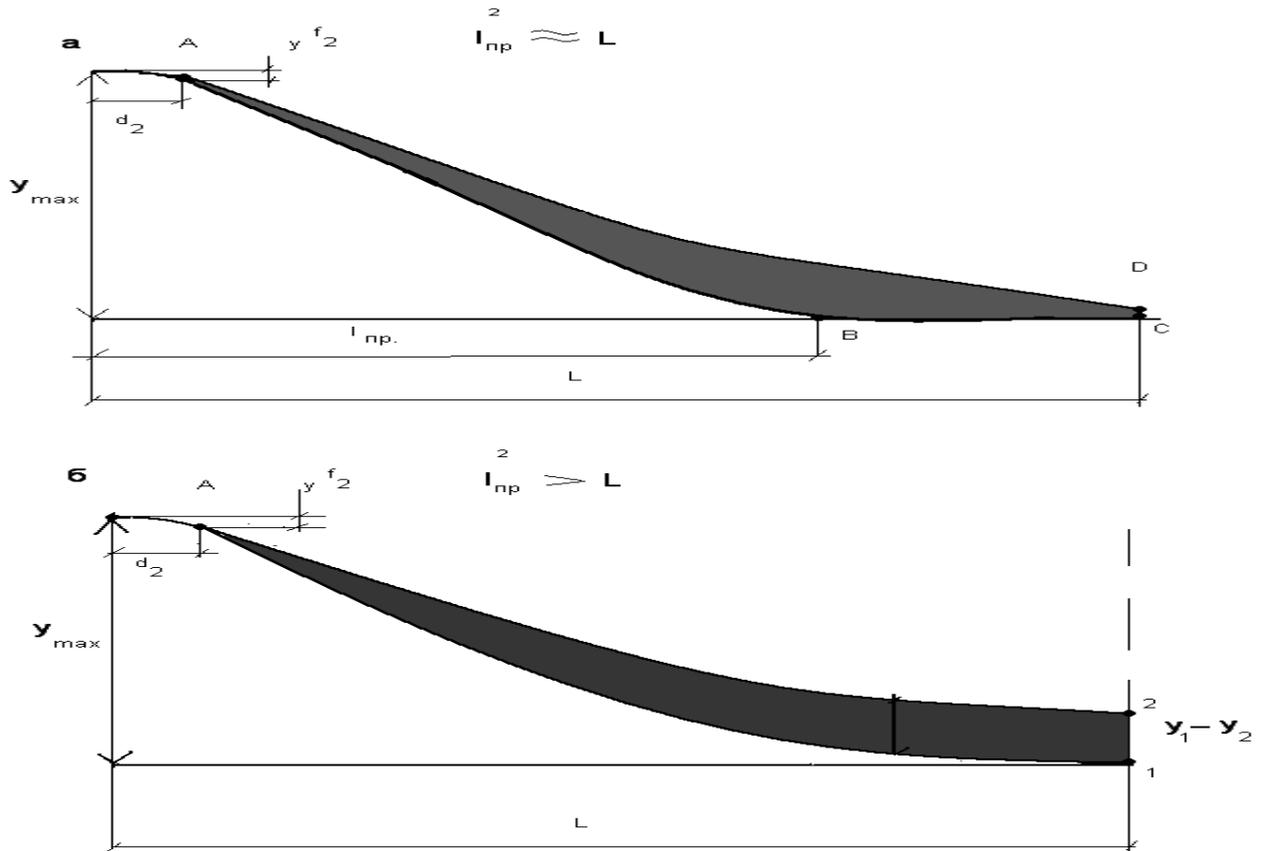


Рис. 6. Параметры полостей расслоения: а - при закрытых полостях; б - при открытых полостях

Площади полостей определяются из выражений:

- вариант а:

$$S_{ABC} = \frac{1}{2}(\gamma_{max} - \gamma^{f_2}) \cdot (L - l_{np});$$

$$S_{ADC} = (L - f_2) \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot \frac{1}{2},$$

- вариант б:

$$S_r = (L - d_2) \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot \frac{1}{2},$$

где:  $S_{ABC}$  – площадь полости, которая закрывается, по треугольнику ABC, м<sup>2</sup>;  $S_{ADC}$  – площадь полости, которая закрывается, по треугольнику ADC, м<sup>2</sup>;  $L$  – полная длина полупролета рассмотренного слоя (2-го верхние слои), м;  $f_2$  – ширина опорной зоны на уровне почвы, м;  $d_2$  – расстояние от конца опорной зоны к точке расслоения породных слоев, м;  $\gamma^{f_2}$  – опускание слоев к точке расслоения, м;  $S_r$  – площадь открытой полости, м<sup>2</sup>;  $l_{np}$  – предельный полупролет основной кровли, м;  $v_1$  и  $v_2$  – опускание породных слоев от начала координат, мм  
Объем полости расслоения определяется из параметров, представленных на рис. 7.

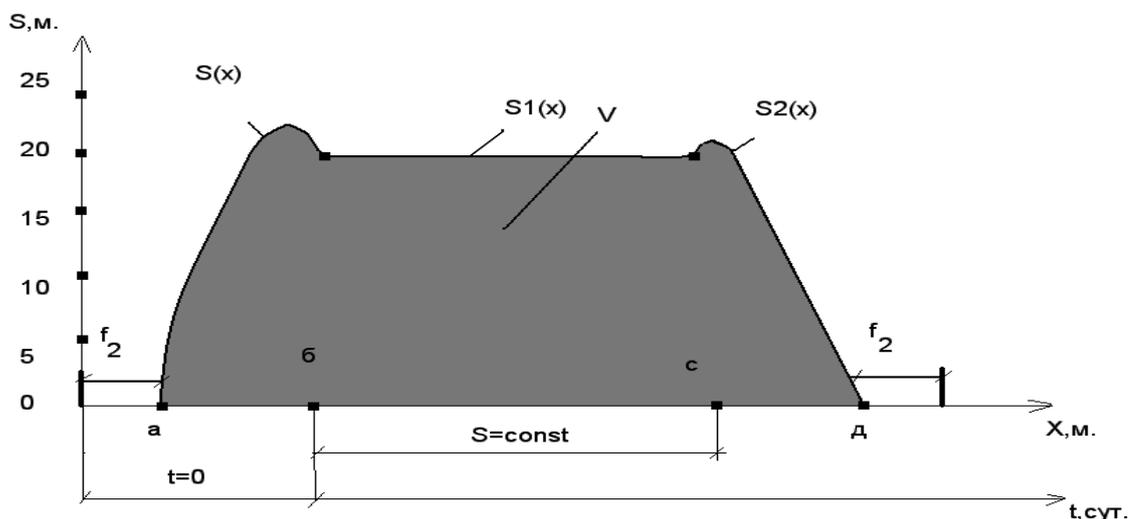


Рис. 7. Графическая схема к определению объема полости расслоения в толще пород над подземным газогенератором

Выходя из построенной графической схемы, находим объем полости расслоения сформированной из трех геометрических фигур:

$$V = \int_a^b S(x) dx + 2S_1(x)vc + \int_c^d S_2(x) dx.$$

Разница между максимальными опусканиями слоев породы определяет максимальную высоту расслоения:

$$W' = y_1(x) - y_2(x).$$

Результаты расчетов позволяют установить параметры полостей расслоения, место их расположения в породном массиве относительно подземного газогенератора, с учетом горно-геологических и технологических условий [2].

## Выводы

Разработанный математический аппарат и алгоритм расчета поведения породного массива при СПГУ позволяет:

- учитывать расслоение, образование вертикальных трещин и полостей сдвига породных слоев друг относительно друга и другие особенности поведения породного массива с учетом изменения мощностных свойств пород, которые поддаются горному давлению и термодинамическим нагрузкам;

- определять НДС породной толщи с учетом естественного фактора и технологических параметров, включая особенности газификации угольного слоя (наличие слоя пепла и возможность сплывания пород в условиях высоких температур в зоне выгазованного пространства подземного газогенератора);

- на основе прогноза поведения породного массива при СПГУ можно обосновать динамику образования и параметры полостей расслоения, установить рациональные параметры технологии инъекционной закладки, которая обеспечивает надежность работы подземного газогенератора.

- устанавливать параметры выгазовывания свиты угольных пластов или мощных пластов как у нисходящему так и восходящему порядку из учетом изменений в НДС породного массива.

## Список литературы

1. Савостьянов А.В., Клочков В.Г. Управление состоянием массива горных пород. – К.: НМКВО, 1992. – 276 с.
2. Либерман Ю.М., Хаимова-Малькова Р.И. Методика расчета напряжений и деформаций угольного пласта при различных способах управления кровлей. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1980.– 28 с.
3. Замисов В.Н. Расчеты деформаций горного массива. – М.: Недра, 1973.–139 с.
4. Борисов А.А. Расчет горного давления в лавах пологих пластов. – М.: Недра, 1964.– 267 с.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 222 с.
6. Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Морозов И.Т. /Метод граничных элементов в задачах горной механики. – Днепропетровск: Наука и образование, 1997.–180 с.
7. Казак В.Н., Орлов Г.В., Попов В.И., Деформация горных пород над выгазованным пространством угольного пласта //Труды ВНИИ Промгаза. – М.: Недра, 1960.– Вып.4. – С.162-165.
8. Савостьянов О.В., Фальштинський В.С., Дичковський Р.О. Механізм поведінки породної товщі при свердловинній підземній газифікації тонких вугільних пластів // Науковий вісник НГА України. –2007.– №10 – С.52-59.