

УДК [622.411.33:533.17]:622.817.47

В.Т. Преслер

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ЗАБОЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ UML-ТЕХНОЛОГИИ

Проведение выработок по угольным пластам сопровождается интенсивным поступлением газа, нередко, реализацией энергии углегазовой среды в форме динамических явлений различной силы. Изменчивость природных свойств пласта по трассе выработки и непостоянство технологических режимов предъявляют жесткие требования к надежности прогноза опасности. В этих условиях особую актуальность приобретает оперативность оценки формирующихся газодинамических ситуаций. Критерием оценки является динамика поступления метана в призабойное пространство выработки в процессе технологического цикла [1]. На формирование этих ситуаций в основном влияют генетически связанные изменения напряженно-деформированного и газокинетического состояний пласта [2]. Решающую роль при этом играют геомеханические процессы в окрестности движущегося забоя выработки.

Пространственная картина распределения напряжений вокруг горных выработок весьма сложна и аналитическими решениями не описывается. Обычно пользуются задачами о плоско деформированном состоянии массива в сечениях, перпендикулярных длине выработки. Перераспределение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива также носит временной характер, связанный с движением забоя и реологическими свойствами пород. Будем моделировать движущийся забой выработки в виде трех взаимно перпендикулярных сечений прямоугольного параллелепипеда, образованного почвой и кровлей выработки, ее бортами, поверхностью забоя и ближайшей крепью. Выбор сечения определяет среду исследования – только угольный пласт, или угольный пласт и породы кровли и почвы. Породы и пласт вокруг выреза представляются как сплошные, в общем случае, неоднородные и не изотропные среды. Однако при получении основных результатов в среде угольного пласта будем представлять его как однородный и изотропный.

Модифицируя постановку задачи Грицко-Власенко для очистного забоя [3] и используя уравнение для ускорения движения массива в его интегрально-дифференциальной форме, запишем уравнения движения массива в окрестности прямоугольного выреза, например, перпендикулярного плоскости пласта:

$$\rho \left( \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \right)_y \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial \tau}{\partial x \partial y}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y},$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y},$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \int \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} dz, \quad v_x = \frac{\partial U_x}{\partial t}, \quad v_y = \frac{\partial U_y}{\partial t},$$

$$\rho \left( \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \right)_x \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial \tau}{\partial x \partial y}, \quad \varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x},$$
(1)

где  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma, p_M)$  описывает семейство декомпрессионных кривых разгрузки массива в зависимости от его свойств ( $p_M$ ),  $(d\varepsilon/d\sigma)_x$ ,  $(d\varepsilon/d\sigma)_y$  указывают на применение этих кривых вдоль осей координат;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau$  - нормальные и касательные напряжения ( $\sigma$  одно из нормальных напряжений);  $t$  - время;  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  - компоненты векторов перемещения и скорости ( $v$  - одна из компонент скорости);  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  - деформации смещения и сдвига ( $\varepsilon$  - одна из деформаций смещения);  $\rho$  - плотность вещества;  $x$  - направление движения забоя,  $y$  - направление, нормальное к плоскости пласта.

Величина  $d\varepsilon/d\sigma$  отражает изменение относительных деформаций массива в зависимости от его НДС. Для упругодеформированной среды имеем

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E} \left( 1 - \mu \cdot \frac{d\sigma_\perp}{dx} \Big/ \frac{d\sigma}{dx} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma_\perp$  - напряжения в площадках, перпендикулярной направлению  $x$  и параллельной ему,  $E$  - модуль упругости,  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Для не упругодеформированной среды  $d\varepsilon/d\sigma$  имеет более сложный вид, но в общем случае зависимость  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$  характеризует семейство декомпрессионных кривых разгрузки массива [4]. При выборе из семейства конкретной характеристики решающее значение имеют два фактора - начальное состояние массива сразу после проведения выреза и период разгрузки в его окрестности. Если одной характеристики недостаточно для описания декомпрессионных свойств массива в окрестности выреза, то производится разбиение этой окрестности на отдельные прямоугольные ячейки, в каждой из которых применяется своя характеристика. Для такого представления имеем

$$\rho \left( \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \right)_x \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{2}{m} \frac{\partial \tau}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \right)_y \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{2}{l} \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau$  - напряжения в целом по ячейке;  $m$ ,  $l$  - размеры ячейки.

Моделирование пространственно-временной картины изменения НДС массива в окрестности выреза проводим через три стадии: упругодеформированное состояние (устанавливается сразу после взятия заходки), пластическое течение (период перехода массива в новое устойчивое состояние), разрушение (завершение процесса).

Упругодеформированное состояние определяется из решения системы уравнений, являющихся начальными условиями задач (1, 3):

$$\begin{aligned} \nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) = 0, & \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} + \gamma \cdot \sin \alpha = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} + \gamma \cdot \cos \alpha = 0, \end{aligned}, \quad (4)$$

где  $\gamma$ ,  $\alpha$  - объемный вес пород и угол падения пласта;  $\nabla^2$  - оператор Лапласа.

Решение упругой задачи (4) ищем в полярной системе координат  $(r, \theta)$  (рис. 1), в которой движение массива описывается системой равнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) + \gamma \cdot \sin(\alpha + \theta) &= 0, \\ \sigma_\theta = E_1 \cdot (\mu \cdot \varepsilon_r + \varepsilon_\theta), \quad \sigma_r = E_1 \cdot (\varepsilon_r + \mu \cdot \varepsilon_\theta), \\ \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r} \tau + \gamma \cdot \cos(\alpha + \theta) &= 0 \\ \tau = \tau_{r\theta} = G \cdot \gamma_{r\theta}, \quad E_1 = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$  - относительные деформации вдоль направлений  $r, \theta$ ;  $G$  - модуль сдвига.

Предполагая, что движение массива зависит от угла  $\theta$ , но происходит вдоль радиального направления, приведем уравнения (5) к виду [6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1-\mu}{2r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \gamma \frac{1-\mu^2}{E} \sin(\alpha + \theta) &= 0 \\ \frac{\partial^2 u}{\partial \theta \partial r} + \frac{1+3-\mu}{r(1-\mu)} \frac{\partial u}{\partial \theta} + 2\gamma \frac{1-\mu}{E} r \cdot \cos(\alpha + \theta) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

где  $u = u(r, \theta)$  - функция перемещения вдоль радиального направления. Решением уравнения (6) является функция:

$$U(r, \theta) = c_1 \cdot \sin(\omega\theta + \Delta\theta) \cdot r^{-\kappa} - \frac{2\gamma}{E} \cdot \frac{1-\mu^2}{5+\mu} \cdot \sin(\alpha + \theta) \cdot r^2 + c_2 \cdot r, \quad (7)$$

где  $\omega = 4/(1+\mu)$ , а постоянные интегрирования  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\Delta\theta$  определяются из условий равновесия элемента на контуре выреза

$$2\tau_0 = \sigma_{\theta,0} \cdot \operatorname{tg}\theta + \sigma_{r,0} \cdot \operatorname{ctg}\theta,$$

постоянства суммы взаимно перпендикулярных

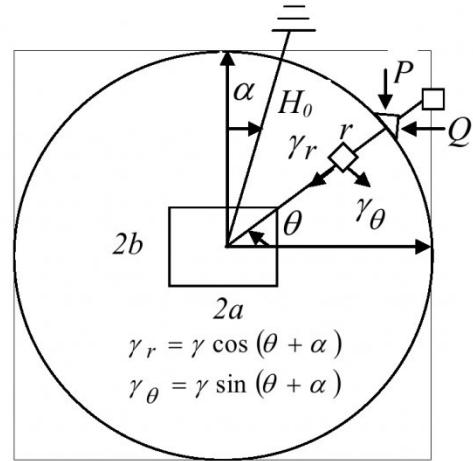


Рис. 1. Геометрическая схема

напряжений в нетронутом массиве

$$\sigma_{\theta,\infty} + \sigma_{r,\infty} = \sigma_\infty / (1 - \mu),$$

отсутствия перемещения в углу выреза  $u(r_a, \theta_a) = 0$ .

В соответствии с этими условиями упругие напряжения запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_\gamma \left[ I + (1 - \mu)d \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^\omega \right] - g_\theta, \\ \sigma_r &= \sigma_\gamma \left[ I - (3 + \mu)d \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^\omega \right] - g_r, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\tau = 2\sigma_\gamma \frac{\cos(\omega\theta + \Delta\theta)}{A_1} \left( \frac{r_0}{r} \right)^\omega - g_\tau,$$

где

$$\begin{aligned} g_\theta &= g_\theta(r) = \\ &= \gamma_0 [2(1 + 2\mu) \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot r - A_2 r_0], \\ \gamma_0 &= \gamma / (5 + \mu), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_r &= g_r(r) = \gamma_0 [2(2 + \mu) \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot r - A_2 r_0] \\ g_\tau &= \gamma_0 \cdot (1 - \mu) \cdot \cos(\theta + \alpha) \cdot r. \end{aligned}$$

Остальные, входящие в (8), величины определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} d &= d(\theta) = \sin(\omega\theta + \Delta\theta) / A_1, \\ A_1 &= A_1(\theta) = (1 + \mu) \cdot \sin(\omega\theta + \Delta\theta) + \\ &\quad + 2 \sin((\omega + 2)\theta + \Delta\theta), \\ \sigma_\gamma &= (\sigma_0 + g_\infty) / [I + (1 + \mu) \cdot d(r_0/r_\infty)^\omega], \\ H(r, \theta) &= H_0 - r \cdot \sin\theta / \cos\alpha, \\ g_\infty &= \gamma_0 [3(1 + \mu) \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot r_\infty - A_2 r_0], \\ A_2 &= A_2(\theta) = \\ &= 3(1 + \mu) \cdot \sin(\theta + \alpha) - (1 - \mu) \cdot \sin(\theta - \alpha), \\ \Delta\theta &= \operatorname{arctg} \frac{4ab}{(p - 1 - \mu)r_a^2 - 2(a^2 - b^2)} - \omega\theta a \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = \frac{0.5 \sigma_\infty}{1-\mu}, r_a = \sqrt{a^2 + b^2},$$

$$p = (1+\mu) \frac{\frac{1+\mu}{1-\mu} \sigma_a - g_{u,a} \left( \frac{r_a}{r_\infty} \right)^\omega}{g_{u,a} - \sigma_a},$$

$$g_{u,a} = \gamma_0 r_a [2(1+\mu) \cdot \sin(\theta + \alpha) - A_2(\theta_a)],$$

$$\sigma_a = g_\infty(\theta_a) + 0.5 \sigma H(r_\infty, \theta_a)/(1+\mu)$$

$$\theta_a = \arctg \frac{b}{a},$$

$\sigma_\infty = \sigma(H_\infty)$  - вертикальное давление в нетронутом массиве,  $H_\infty = H(r_\infty, \theta)$  - расстояние от точки  $(r_\infty, \theta)$  до поверхности Земли,  $r_0$ ,  $r_\infty$  - расстояния от центра выреза до его граней и некоторой окружности, за пределами которой возмущения, вызванные вырезом, исчезают,  $H_0$  - расстояние от центра выреза до поверхности,  $\sigma_{r,0}$ ,  $\sigma_{\theta,0}$ ,  $\tau_0$  и  $\sigma_{\theta\infty}$ ,  $\sigma_{r\infty}\theta$  - нормальные и касательные напряжения, действующие на контуре выреза и на расстоянии  $r_\infty$  от него.

Как известно, на малых глубинах давление вертикального столба не отражает действительную картину распределения напряжений в нетронутом массиве. В связи с этим величину вертикального давления  $\sigma = \sigma(H)$  будем оценивать на основе подхода, опирающегося на модель "половины шара" с радиусом соответствующим глубине  $H$  и с синусоидальным распределением напряжений  $\sigma_S$  на его сферической части поверхности (рис. 2). Исходя из этого распределения и веса половины шара, можно записать:

$$\int_S \sigma_S ds = \int_V \rho g \cdot dv = \pi \int_0^H \rho g \cdot (H^2 - x^2) dx,$$

$$\sigma_S = \sigma_n + (\sigma(H) - \sigma_n) \cdot \sin \varphi i \quad (9)$$

$$g = g_0 (1 - H/R),$$

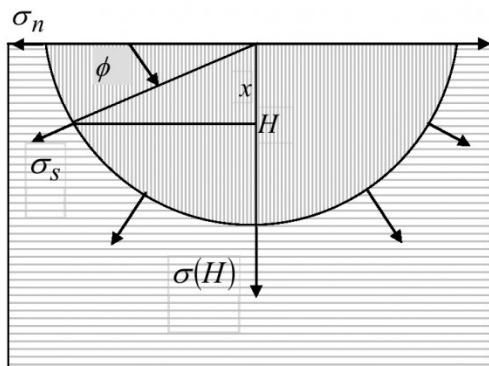


Рис. 2. Геометрическая схема расчета вертикального давления в массиве

где  $g_0$ ,  $\sigma_n$  – ускорение свободного падения и напряжение на поверхности Земли,  $R$  – ее радиус,  $S$  и  $V$  указывают на интегрирование по площади и объему. Полагая  $\rho = \text{const}$ , после интегрирования получим

$$\sigma(H) = \frac{2}{3} g_0 \rho H \cdot \left( 1 - \frac{3H}{8R} \right) - \sigma_n. \quad (10)$$

Как показывает анализ, эпюры (8) имеют более крутой характер спада и меньшую амплитуду в отличие от эпюр на круглом вырезе в гидростатическом поле напряжений [7].

Применение теории пластического течения Треска [7] позволяет значительно облегчить решение задач (1, 3), сведя их к последовательному ряду стационарных задач (5), решаемых в поле максимальных касательных напряжений ( $\tau = \tau_{max}$ ) при стремлении со временем критерия пластичности к константе Треска для данных пород. Согласно этому подходу, пластическое течение в окрестности выреза описывается уравнениями

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \geq k, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = (2 + B_1) \frac{\tau_{max}}{r} - \gamma \cdot B_2,$$

из решения которых получим эпюры напряжений:

$$\sigma_r = \sigma_{r,0} + \Delta \sigma, \quad \sigma_{r,0} = 2 \tau_{max} \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \theta}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta},$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{\theta,0} + \Delta \sigma, \quad \sigma_{\theta,0} = 2 \tau_{max} \frac{1 + \operatorname{tg} \theta}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta},$$

$$\tau_{max} = k_T + (\tau_{max,0} - k_T) \cdot e^{-\beta t},$$

$$\Delta \sigma = (2 + B_1) \cdot \ln \frac{r}{r_0} - \gamma \cdot B_2 \cdot (r - r_0),$$

$$B_1 = \omega \cdot \operatorname{tg}(\omega \theta + \Delta \theta) + \frac{1}{A_1} \frac{dA_1}{d\theta},$$

$$B_2 = \sin(\theta + \alpha) \left[ 1 + \frac{1-\mu}{5+\mu} (1 - B_1 \operatorname{ctg}(\theta + \alpha)) \right], \quad (12)$$

где  $\tau_{max,0} = (2 - \mu) \cdot \sigma_\gamma \cdot d$  – максимальные на контуре выреза касательные напряжения,  $k_T$  – константа Треска для данных пород,  $\beta$  – показатель спада во времени напряжений на контуре.

Точка сопряжения  $r_*$  упругих (8) и пластических (12) эпюр определяется из уравнения:

$$\sigma_{\theta,0} + (2 + B_1) \cdot \ln \frac{r_*}{r_0} - \gamma B_2 (r_* - r_0) = \sigma_\gamma \left[ 1 + (1 - \mu) d \cdot \left( \frac{r_\phi}{r_*} \right)^\omega \right] - g_{\theta,*} \quad (13)$$

где  $(r_0 - r_*)$  – размер зоны пластических деформа-

ций,  $r_\phi$  - радиус, характеризующий фиктивное увеличение размеров выреза в результате пластического течения, определяется из уравнения

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta,0} + (2+B_1) \cdot \ln \frac{r_\phi}{r_0} - \gamma B_2 (r_\phi - r_0) = \\ = \sigma_\gamma \cdot \left[ 1 + (1-\mu)d \cdot \left( r_0/r_\phi \right)^\omega \right] - g_{\theta,\phi}, \\ g_{\theta,\phi} = g_\theta(r_\phi), \quad g_{\theta,*} = g_\theta(r_*).\end{aligned}$$

Спад максимальных касательных напряжений за некоторое время до уровня константы Треска приводит к устойчивой зоне пластических деформаций, которая находится в состоянии равновесия и размеры которой практически не изменяются с течением времени. Однако, вблизи контура выреза пластическое течение переходит в стадию разрушения породы. Используя известные условия разрушения мелкозернистых сред со сцеплением [7]

$$\begin{aligned}\tau_n = K + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi, \\ \sigma_\theta = \lambda \cdot \sigma_r + K \cdot v, \\ \lambda = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad v = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi},\end{aligned}\quad (14)$$

нетрудно получить дифференциальное уравнение, описывающее распределение радиальных напряжений в зоне разрушения

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \eta \cdot \frac{\sigma_r}{r} + \frac{K \cdot v}{r} - \gamma \cdot B_2. \quad (15)$$

В результате интегрирования уравнения (15) с учетом (14) получим эпюры нормальных напряжений в зоне разрушения

$$\begin{aligned}\sigma_r = \sigma_{r,0}^* \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^\eta + \frac{K \cdot v}{\eta} \cdot \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^\eta - 1 \right] - \frac{\gamma B_2 r}{\eta - 1} \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\eta-1}, \\ \sigma_\theta = \sigma_{\theta,0}^* \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^\eta - K v \left( 1 - \frac{\lambda}{\eta} \right) \cdot \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^\eta - 1 \right] - \frac{\gamma \lambda B_2 r}{\eta - 1} \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\eta-1}, \\ \sigma_{r,0}^* = 2 \tau_{max} \cdot \frac{\sin 2\varphi}{1 + \cos 2\varphi}, \quad \sigma_{\theta,0}^* = \lambda \cdot \sigma_{r,0}^* + K \cdot v,\end{aligned}\quad (16)$$

где  $\sigma_n$ ,  $\tau_n$  - нормальные и касательные напряжения, действующие в плоскости скольжения,  $\varphi$  - угол внутреннего трения,  $K$  - коэффициент сцепления материала,

$$\eta = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{B_1}{2} \cdot \frac{1 + \cos 2\varphi}{\sin 2\varphi}$$

- показатель роста амплитуды эпюр. Размер зоны разрушения определяется из уравнения сшивки эпюр  $\sigma_\theta^n(r_+) = \sigma_\theta^p(r_+)$  в зонах пластических деформаций (12) ( $\sigma_\theta = \sigma_\theta^n$ ) и разрушения (16) ( $\sigma_\theta = \sigma_\theta^p$ ), где  $r_+$  - радиус зоны разрушения.

Для реализации рассмотренного подхода с целью получения пространственно-временных картин изменения НДС массива в окрестности выреза наиболее эффективна UML-технология программирования. Она представляет собой графический унифицированный язык моделирования, визуализации, спецификации, конструирования и документирования систем и задач предметных областей, в которых большую роль играет программное обеспечение. Посредством UML

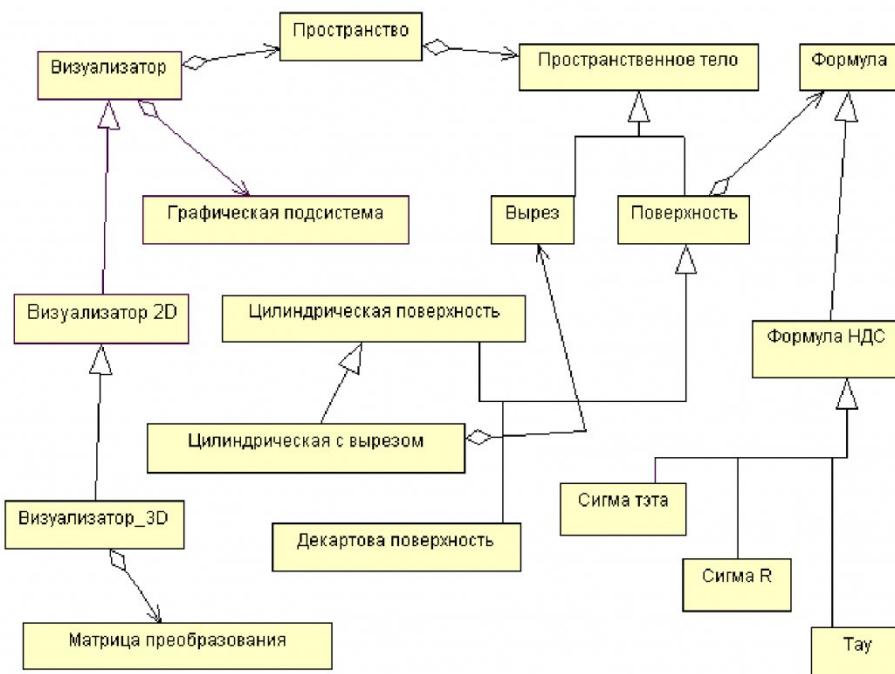


Рис.3. UML-модель расчета и визуализации пространственно-временных картин НДС массива

разрабатываются детальные планы структурирования и решения предметных задач, отображающие не только их концептуальные элементы, такие как системные функции и процессы, но и конкретные особенности реализации, в том числе классы, написанные на специальных языках программирования, схемы баз данных, и программные компоненты многократного использования [8]. UML интегрирует и развивает наиболее сильные стороны современных мощных языков моделирования Booch, OOSE, OMT и реализует три цели:

- моделирует системы и задачи целиком, от концепции до исполняемого артефакта, посредством объектно-ориентированных методов;
- решает проблему масштабирования, присущую сложным системам;
- создает такой язык моделирования, который может использоваться не только людьми, но и компьютерами.

Для создания статических и динамических моделей в большинстве предметных областей достаточно использовать лишь 30% средств UML, среди которых структурные базовые сущности (классы, атрибуты, операции, прецеденты, компоненты, пакеты), структурные базовые отношения (зависимости, обобщения, ассоциации) и базовые поведенческие сущности (простые автоматы, взаимодействия).

На рис. 3 представлена блочная структура UML-модели, реализующая рассмотренный подход. Модель включает следующие объекты (классы):

- **пространственное тело** – обобщение понятия тела в пространстве;
- **пространство** – совокупность тел в одной системе координат;
- **формула** – объект, возвращающий значение функции двух аргументов;
- **вырез** – условный объект, обозначающий размеры выреза в пласте;
- **визуализатор** – общее средство визуального изображения *пространства*;
- **визуализатор 2D** – частный случай *визуализатора*, работает в двумерном *пространстве*;
- **визуализатор 3D** – частный случай *визуализатора 2D*, работает в трехмерном *пространстве* и проецирует его на двумерное *пространство*;
- **поверхность** – пространственное тело в виде сетки, изображающее зависимость одной координаты от двух других по соответствующей формуле;
- **декартова поверхность** – частный случай *поверхности* в декартовой системе координат;
- **цилиндрическая поверхность** – частный случай *поверхности* в цилиндрической системе координат;
- **цилиндрическая поверхность с вырезом** – частный случай *цилиндрической поверхности* с вырезом.

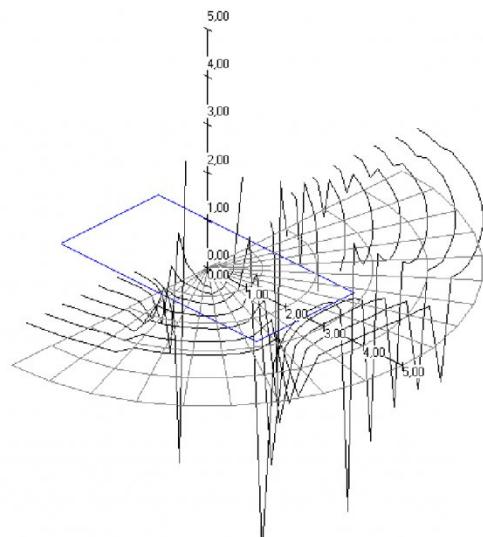


Рис. 4. Картина распределения нормальных напряжений  $\sigma_r$  в окрестности выреза

сти, не содержащей сетки в пределах выреза;

- **формула НДС** – базовая формула для трех эпюор:  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau$ ;
- **матрица преобразования** – матрица  $4 \times 4$ , позволяющая производить любые преобразования пространства – поворот вокруг оси, сдвиг на вектор, растяжение вдоль осей.

На рис. 4 – 6 приведены результаты моделирования НДС массива в окрестности забоя очистной выработки. Вырез размещен нормально к пласту ( $a = 2,5$  м,  $b = 1,25$  м). Напряжения измеряются в  $\text{t/m}^2$ . Исходные величины имеют следующие значения:  $\gamma=2 \text{ t/m}^3$ ,  $K=200 \text{ t/m}^2$ ,  $v=0.25$ ,  $\varphi=30^\circ$ .

На рис. 4, 5 приведены картины распределения упругих нормальных напряжений на глубине 100 м в почве, пласте и кровле (полуокружность впереди забоя) на момент снятия стружки.

На рис. 6 - временные эпюры нормальных напряжений в угольном пласте впереди забоя на

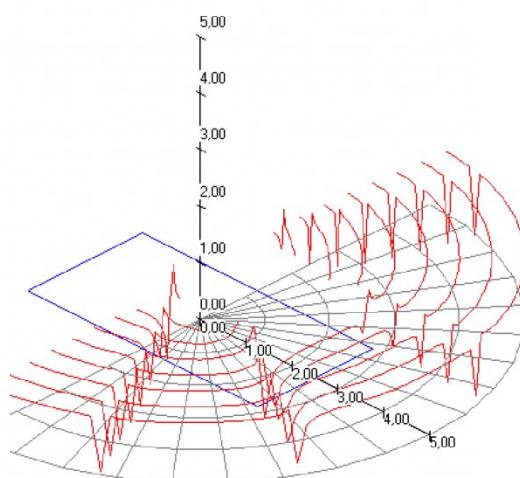
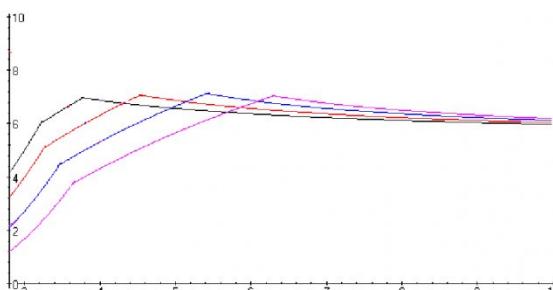


Рис. 5. Картина распределения нормальных напряжений  $\sigma_\theta$  в окрестности выреза



*Рис. 6. Временное распределение нормальных напряжений  $\sigma_\theta$  в пласте*  
впереди забоя на момент снятия стружки,  
через 0.4 сут. 1.3 сут. 3 сут

глубине ведения горных работ 500 м, отражающие изменение НДС со временем в результате пластического течения массива, переходящее в разрушение пласта в ближайшей окрестности выреза.

#### *Выводы*

1. Предположение о движении массива только вдоль радиального направления, но в зависимости от угла  $\theta$ , упрощает решение упругой задачи и позволяет получить функцию перемещения массива в аналитическом виде, согласно которой эпюры нормальных и касательных напряжений удается выразить аналитически через радиус и угол в полярной системе координат. Эти эпюры внешне напоминают эпюры круглого выреза, но имеют более крутой характер спада и в среднем меньшую амплитуду в отличие от эпюр на круглом вырезе в гидростатическом поле напряжений. Однако, в отличие от них, за счет периодических

составляющих, учитывающих неравномерность контура (прямые углы), полученные эпюры имеют резкие всплески, соответствующие его резким изменениям.

2. Применение теории Треска сводит решение задачи пластического течения к последовательному ряду стационарных задач, решаемых в поле максимальных касательных напряжений. При этом полученные в аналитическом виде, эпюры нормальных напряжений характеризуют со временем смещение зоны их концентрации в глубину массива. Получено уравнение для расчета размера зоны пластических деформаций.

3. Использование условия разрушения мелкозернистых сред со сцеплением позволило получить в аналитическом виде эпюры распределения нормальных напряжений в зоне разрушения и построить уравнение для определения протяженности этой зоны. В отличие от круглого выреза эпюры описывают более интенсивный и мощный процесс разрушения в окрестности прямоугольного выреза.

4. UML-модель, соответствующая геомеханическим представлениям о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород в окрестности движущегося забоя, обеспечивает оперативный и адекватный горным условиям расчет картин распределения напряжений и стабилизации зоны их концентрации, а также расчет протяженности зоны разрушения и пластических деформаций. Полученные картины визуализируются в объемном и плоскостном пространственном изображении.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Полевщиков Г.Я. Разработка адаптивных методов предупреждения и локализации динамических газопроявлений при проведении выработок по угольным пластам: Автореферат дисс. докт. техн. наук. – Кемерово, 1998. – 52 с.
2. Преслер В.Т., Гарнага А.В. Динамическая модель подготовительной выработки // Международная научно-практическая конференция “Экологические проблемы угледобывающей отрасли в регионе при переходе к устойчивому развитию”. Кемерово, - Т.2, - 1999. с. – 210-220.
3. Грицко Г.И., Власенко Б.В. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: Наука, 1976. - 192 с.
4. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. - М.: Госгортехиздат, 1961. - 363 с.
5. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М: Высшая школа, 1990. – 250 с.
6. Преслер В.Т. Информационно-математическая среда прогноза газопроявлений в угольных шахтах. – Кемерово: Кузбассвязиздат, 2000. –228 с.
7. Айзаксон Э. Давление горных пород в шахтах. -М.: Госгортехиздат, 1961. - 176 с.
8. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: ДМК, 2000. – 432 с.

Автор статьи:

Преслер  
Вильгельм Теобальдович  
- докт.техн.наук, проф. каф. ИиАПС,  
ведущий научный сотрудник Института  
угля и углехимии СО РАН