

10. Петрушева И.И. Свободные колебания слоистой упругой цилиндрической оболочки. //Труды XVIII Межресп. конф. Кемерово, 1-3 июля 2003 / Под ред. В. М. Фомина. Новосибирск, 2003. С. 140–145.

□Автор статьи:

Петрушева

Ирина Ивановна

- старший преподаватель каф. прикладной математики

УДК 622.241.54

Н. В. Черданцев, В.Ю. Изаксон

УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТКИ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ, ПРОЙДЕННОЙ В МАССИВЕ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Задача об устойчивости породных обнажений в окрестности горной выработки, а также задача об устойчивости самой выработки являются основными при её проектировании и сооружении. Выработка считается устойчивой, если за ее контуром не образуются зоны нарушения сплошности окружающего массива. Зоны нарушения сплошности – области, в которых при упругом распределении напряжений, происходят разрушения сдвигом или отрывом по наименее прочным направлениям породного массива, называемых поверхностями ослабления, наличие которых в массиве осадочных горных пород связано с его генезисом. Обычно расчеты напряженного состояния массива горных пород производятся при вертикальных и горизонтальных напряжениях на бесконечности. Если выработка проходится в зоне влияния тектонических воздействий, то следует рассчитывать

напряжения и деформации при произвольном направлении главных напряжений на бесконечности и величинах не равных γH .

Следовательно, для оценки устойчивости горной выработки необходимо знать напряженное состояние в ее окрестности. Поскольку породный массив в окрестностях протяженных горных выработок находится в состоянии плоской деформации, то задача о напряженном состоянии в их окрестности формулируется следующим образом [1]: в бесконечной невесомой прямоугольной пластине, стороны которой нагружены напряжениями

$$\sigma_{11}^{\infty} = \eta \gamma H, \sigma_{22}^{\infty} = \lambda \eta \gamma H, \sigma_{33}^{\infty} = \lambda \eta \gamma H$$

и повёрнуты к горизонту на угол ξ , сооружается выработка произвольного сечения (рис. 1). Здесь η, λ коэффициенты, в общем случае отличные от

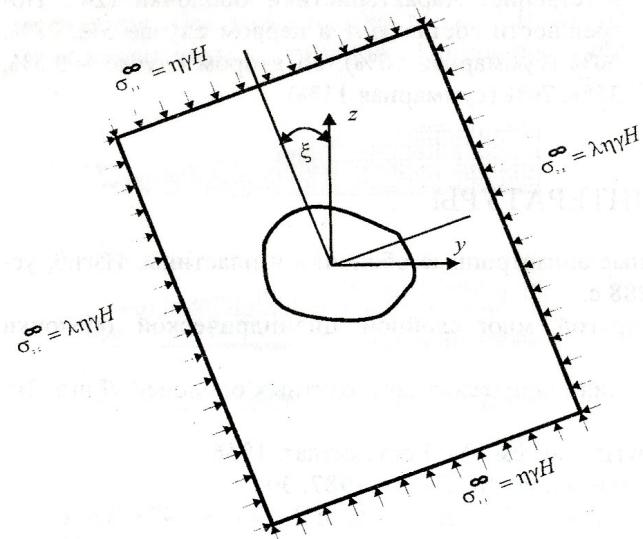


Рис. 1. Расчётная схема задачи

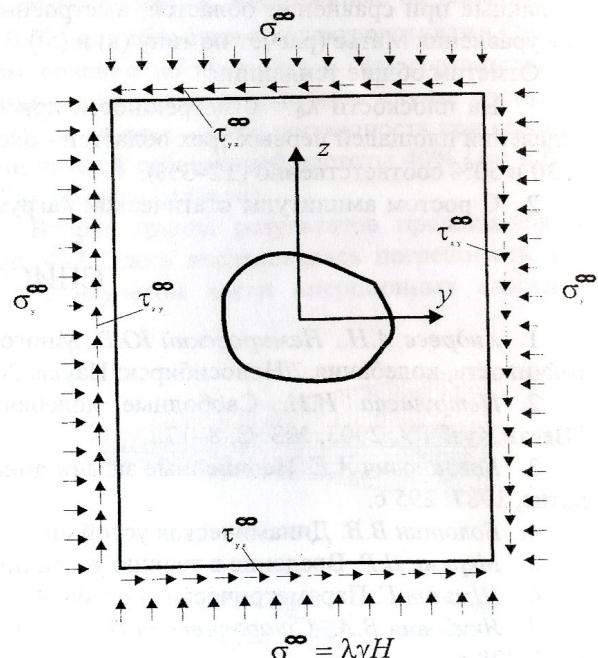


Рис. 2. Стороны бесконечной пластины, ориентированные горизонтально и вертикально

единицы, γ - объёмный вес пород, H - глубина за-
ложения выработки.

При повороте пластины на её сторонах возни-
кают новые напряжения, которые можно опреде-
лить по формулам [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_z^\infty &= \frac{\sigma_{11}^\infty + \sigma_{22}^\infty}{2} + \frac{\sigma_{11}^\infty - \sigma_{22}^\infty}{2} \cos 2\zeta \\ \sigma_y^\infty &= \frac{\sigma_{11}^\infty + \sigma_{22}^\infty}{2} + \frac{\sigma_{22}^\infty - \sigma_{11}^\infty}{2} \cos 2\zeta, \\ \tau_{yz}^\infty &= \frac{\sigma_{11}^\infty - \sigma_{22}^\infty}{2} \sin 2\zeta, \\ \sigma_x^\infty &= \sigma_{33}^\infty + v(\sigma_{11}^\infty + \sigma_{22}^\infty),\end{aligned}\quad (1)$$

в которых v коэффициент Пуассона материала
среды. Расчётной схемой задачи может быть при-
нята также схема на рис. 2.

Для решения поставленной задачи весьма эф-
фективным является метод граничных интеграль-
ных уравнений [3 - 6], сущность которого заклю-
чается в следующем. К контуру отверстия прикла-
дывается компенсирующая (фиктивная) нагрузка
некоторой интенсивности a . Совместно с напря-
жениями на бесконечности, реакцией крепи F (ес-
ли крепь установлена) компенсирующая нагрузка
в каждой точке контура должна удовлетворять
условиям на поверхности контрольного отверстия. Это
позволяет составить интегральное уравнение,
имеющее при плоской деформации следующий
вид [5]:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}a_q(Q_0) - \int \Phi_{qm}^*(Q_0, M_0) a_m(M_0) dL_{M_0} &= \\ &= n_q(Q_0) \sigma_{qm}^\infty - F_q(Q_0),\end{aligned}\quad (2)$$

в котором интегрирование выполняется вдоль ли-
нии контура выработки. В уравнении (2)
 $\Phi_{qm}^*(Q_0, M_0)$ - тензор Грина, определяемый
как [3, 5, 6]:

$$\begin{aligned}\Phi_{qm}^*(Q_0, M_0) &= \frac{1}{4\pi\pi(-v)r} \times \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &(1 - 2vv) \left(\frac{x_q n_m}{r} - \frac{n_q x_m}{r} \right) + \\ &+ \left[(1 - 2vv)_{qm} + 2 \frac{x_q x_m}{R^2} \right] \frac{n_t x_t}{r} \end{aligned} \right\} \quad (3)\end{aligned}$$

v - коэффициент Пуассона, индексы $q, m, t = 1, 2$
- номера координатных осей: ось 1 - y , ось 2 - z , r
- расстояние между точками Q_0 и M_0 , δ_{qm} - сим-
вол Кронекера, L - длина линии контура попереч-
ного сечения выработки, n_q, n_m - единичные
векторы внешних нормалей, проведенных к линии
контура в точках Q_0 и M_0 ;

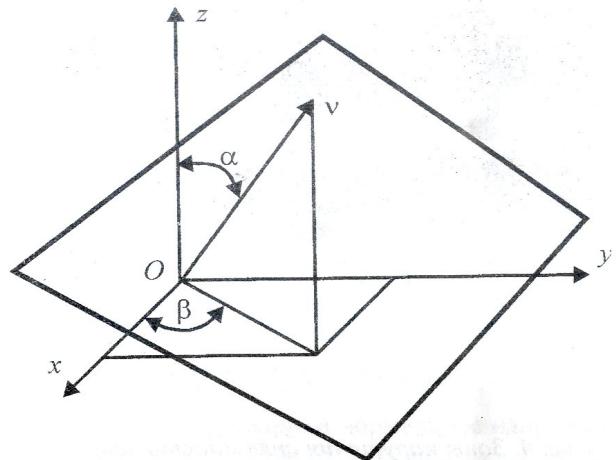


Рис. 3. Положение поверхности ослабления в пространстве

$$\sigma_{qm}^\infty = \begin{pmatrix} \sigma_x^\infty & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^\infty & \tau_{yz}^\infty \\ 0 & \tau_{yz}^\infty & \sigma_z^\infty \end{pmatrix} \text{ - тензор напря-}$$

жений на бесконечности.

Заменяя в (2) интеграл суммой и затем интегрируя по каждому участку длиной ΔL_i в пределах которого $a_i = \text{const}$, приходим к N векторным уравнениям относительно a_i^*

$$\frac{1}{2}a_{q,i}^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Phi_{qm,ij} a_{m,j}^* \Delta L_i = n_{q,i} \tau_{qm,i}^\infty - F_{q,i}^* \quad (4)$$

Напряжения в произвольной точке плоскости определяются посредством суммирования решения от действия компенсирующей нагрузки и напряжений на бесконечности

$$\sigma_{qm,k} = \sigma_{qm,t,k} a_{t,j}^* + \sigma_{qm,k}^\infty, \quad (5)$$

где тензор Кельвина $\sigma_{qm,t}^*$ определяется из [3, 5]:

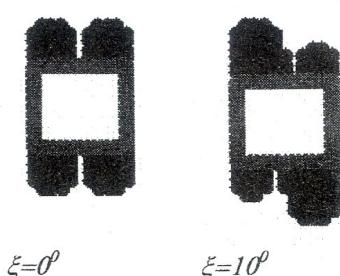
$$\begin{aligned}\sigma_{qm,t}^* &= \frac{1}{4\pi\pi(-v)r^2} \times \\ &\times \left[(1 - 2vv)(m_t x_q + \delta_{qt} x_m - \delta_{qm} x_t) + \frac{2x_q x_m x_t}{r^2} \right] \quad (6)\end{aligned}$$

Напряжение σ_x , параллельное оси выработки определяется из обобщенного закона Гука. Таким образом, поле напряжений в окрестности выработки определено.

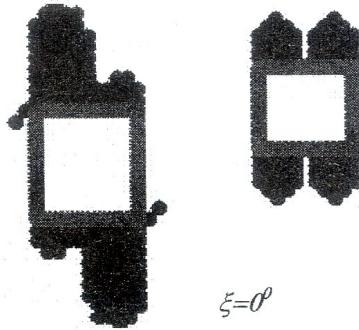
Критерием разрушения породного массива с поверхностью ослабления принят критерий Мора-Кузнецова:

$$\tau_{np} \geq \sigma_v n + K, \quad (7)$$

где K -коэффициент сцепления, $a = \operatorname{tg} \varphi$ (φ - угол внутреннего трения пород прослойка).

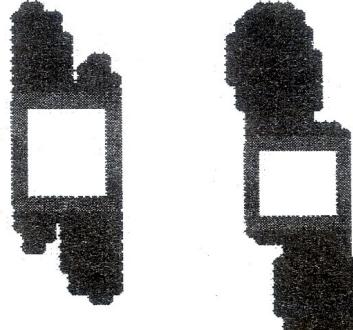


$\xi=0^\circ$ $\xi=10^\circ$



$\xi=0^\circ$

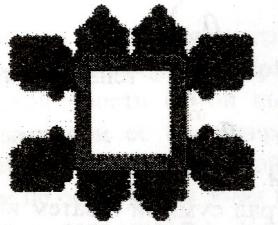
$\xi=20^\circ$



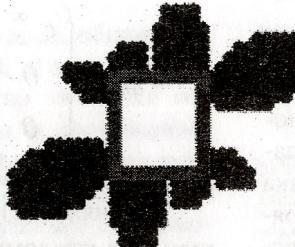
$\xi=10^\circ$

$\xi=20^\circ$

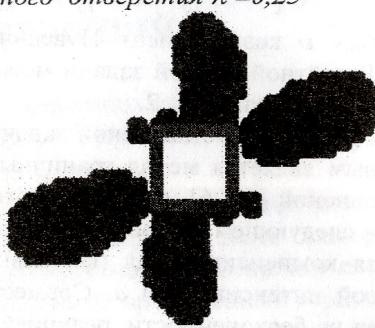
Рис. 4. Зоны нарушения сплошности вокруг квадратного отверстия $\lambda = 0,5$



$\xi=0^\circ$



$\xi=10^\circ$



$\xi=20^\circ$

Рис. 6. Зоны нарушения сплошности вокруг квадратного отверстия $\lambda = 2$

Произвольно ориентированная в пространстве поверхность ослабления может быть задана углами α, β (рис. 3). Нормальные σ_v , касательные τ_v и полные напряжения p_v на поверхности ослабления в случае плоской деформации определяются по формулам [4, 5]:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{yz} lm, \\ p_v^2 &= (\sigma_x l)^2 + (\sigma_y m + \tau_{yz} n)^2 + (\tau_{yz} m + \sigma_z n)^2, \\ \tau_v &= \sqrt{p_v^2 - \sigma_v^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

l, m, n - направляющие косинусы углов между нормалью к площадке и координатными осями:

$$l = \cos(\nu, x) = \sin \alpha \cdot \cos \beta,$$

$$m = \cos(\nu, y) = \sin \alpha \cdot \sin \beta,$$

$$n = \cos(\nu, z) = \cos \alpha. \quad (9)$$

На рис. 4 - 6 показаны зоны нарушения сплошности в виде затемненных областей вокруг квадратного отверстия при различных значениях λ, ξ со следующими исходными данными: $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ, K = 0, n = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364, \eta = 1$.

Выводы

1. Угол наклона бесконечной пластины оказывает влияние лишь в негидростатическом поле напряжений.

2. Увеличение угла наклона бесконечной плоскости увеличивает размеры зон нарушения сплошности в окрестности горизонтальной выработки квадратного поперечного сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лурье А. И. Теория упругости. - М.: Наука. - 1970. - 940 с.
- Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. - М.: Мир. - 1987. - 525 с.
- Ерсанов Ж. С., Изаксон В. Ю., Станкус В. М. Комбинированные выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчёт устойчивости. Кемерово, 1976. 216 с.
- Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике. Под ред. Т. Круза и Ф. Риццо. - М.: Мир. - 1978. - 210 с.

□ Авторы статьи:

Черданцев
Николай Васильевич

- канд.техн.наук, доц каф. сопротивления материалов, старший научный сотрудник Института угля и углехимии СО РАН

Изаксон

Всеволод Юрьевич

- докт.техн.наук, проф., главный научный сотрудник Института угля и углехимии СО РАН