

## К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обґрунтована розрахункова схема до оцінки пружно-деформованого стану охоронних ціликів між тунелями під Керченською протокою. Визначено параметри ціликів та безпечний строк експлуатації об'єкта.

## TO THE VALUING OF PROTECTIVE CRAMP STABILITY BY MEANS OF FINITE ELEMENT METHOD

Design circuit for estimation of elastic state of protective pillars between tunnels under the Kerch Strait is provided. The parameters and safety period of exploitation are defined.

**Обоснование параметров геомеханической модели.** Назначением ленточных предохранительных целиков, как конструктивных несущих элементов подземного объекта, является предотвращение развития недопустимых деформаций в окрестности образованных в породном массиве выработок.

В рассматриваемой задаче исследуется прочность целиков между туннелями, которые сооружаются под дном Керченского пролива. Вмещающие породы представлены плотными глинами. Их физико-механические параметры следующие: предел прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сжс} = 20$  МПа; модуль Юнга  $E = 2400$  кг/см<sup>2</sup>; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,37$ ; объемный вес  $\gamma = 2480$  кг/м<sup>3</sup>.

Влияние неоднородности и естественной трещиноватости на прочность окружающих пород и, соответственно, устойчивость проводимых тоннелей, учитывается путём применения коэффициента структурного ослабления массива [1]:

$$k_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \exp(-0,25\eta) \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент вариации прочности породного массива, определяемый по формуле:

$$\eta = \sqrt{\frac{l_T + l_0}{l_T} (\eta_0^2 + 1)} - 1, \quad (2)$$

где  $l_T$  – среднее расстояние между трещинами;  $l_0$  – характерный размер стандартного породного образца;  $\eta_0$  – коэффициент вариации результатов лабораторных испытаний породных образцов.

Для рассматриваемых условий  $k_c = 0,7$ .

На границе исследуемой области отношение величины бокового давления к величине вертикального давления характеризуется коэффициентом бокового

распора  $\lambda$ . Для рассматриваемых условий по разным причинам (геологическое время, невысокая прочность вмещающих пород и т.п.)  $\lambda = 1,0$ .

Тоннели, между которыми располагаются ленточные целики, расположены горизонтально, симметрично по отношению к вертикальной оси  $Y$ . Диаметр центрального технологического тоннеля в черне составляет 5,4 м; диаметры северного и южного ж/д тоннелей в черне – 8,4 м.

Расчетная схема (рис. 1) включает часть массива с размерами в поперечном сечении 65x90 м.

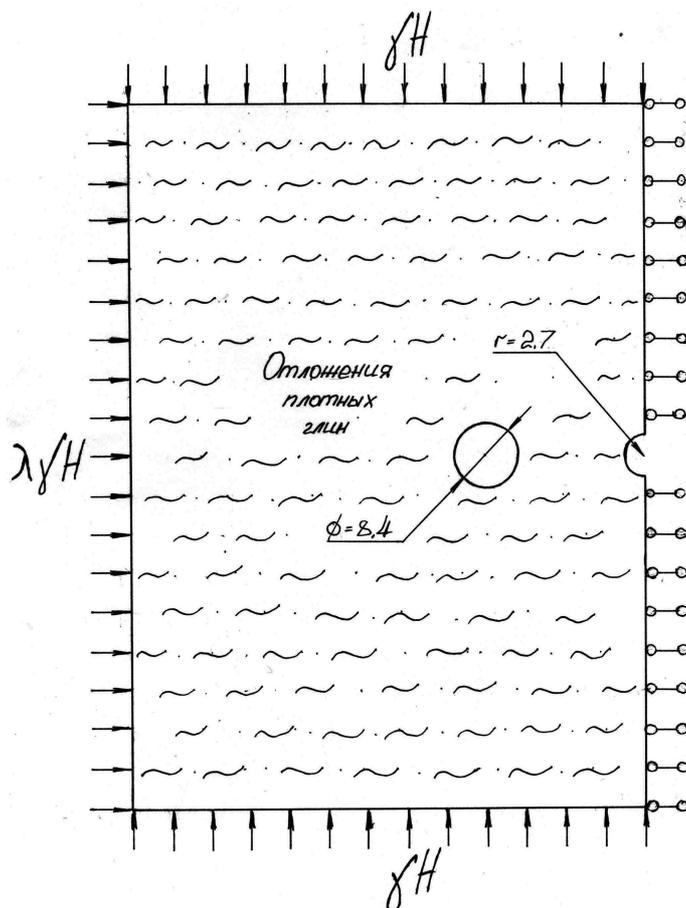


Рис. 1. – Расчетная схема исследуемого тоннеля

Симметричное расположение трех тоннелей дает возможность разделить вертикально исследуемый массив пополам и рассматривать только одну его часть. Отброшенная область жестко закрепляется без возможности перемещаться вдоль оси  $X$ . Размеры предохранительных целиков варьировались от 5 до 25 м с интервалом в 5 м.

**Методика численного моделирования.** Решение задачи осуществлялось пошагово методом конечных элементов (МКЭ). Исследуемая область аппроксимирована прямоугольными элементами. Решалась задача плоской деформации.

Таким образом, исследуемый породный массив представлен весомой упругой плоскостью, нагруженной нормальной равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью  $q = \gamma H = 111600 \text{ кг/м}^2$  по верхней границе. По боковым

границам исследуемый массив нагружен равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью  $\lambda\gamma H$  ( $\lambda = 1$ ).

В каждой рассматриваемой точке массива опасность разрушений среды определялась на основе точечного критерия прочности путем сравнения эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  с пределом прочности пород на одноосное сжатие  $R_c$ . Условие разрушения имеет следующий вид:

$$\sigma_e \geq R_c k_c, \text{ или } Z \geq \frac{R_c k_c}{\sigma_{сж}}. \quad (3)$$

Здесь  $Z$  – величина запаса прочности целика в центре конечного элемента. Эквивалентное напряжение в произвольной точке для случая плоской задачи определяется по формуле [2]:

$$\sigma_e = \frac{[\sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 16\psi\tau^2}] - (1-\psi)(\sigma_1 + \sigma_3)}{2\psi} \quad (4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – компоненты главных напряжений;  $\psi$  – коэффициент хрупкости, равный отношению  $\psi = \frac{R_p}{R_c}$ . Здесь  $R_c$  и  $R_p$  – соответственно пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение.

Область, внутри которой выполняется условие (3), считается разрушенной. Однако разрушение целика, как конструктивного элемента, может произойти только в том случае, если выполнится некоторое интегральное условие прочности, определяющее целостность всей системы «выработка-массив». Применительно к рассматриваемой расчетной схеме целик полагается разрушенным, если в сечении, которое проходит через середину его высоты, все элементы будут иметь запас прочности меньше единицы, т. к. в каждом конечном элементе выполнится условие (3).

**Анализ результатов моделирования.** Для исследуемой расчетной схемы получена картина напряженно-деформированного состояния целика и определены размеры области неупругих деформаций.

На рис. 2 показана картина распределения эквивалентных напряжений в окрестности тоннелей, при размере предохранительного ленточного целика 20 м. Условная зона максимального разрушения горизонтальной срединной линии представлена на рис. 3.

Эта линия есть кратчайшее расстояние между двумя тоннелями. Результаты расчета показали, что концентрация наибольших напряжений находится по контуру выработки (см. рис. 2, рис. 3).

Видно, что по центру целика образуется, так называемое ядро, которое находится в условиях всестороннего сжатия. Его наличие обуславливает длительную прочность целика, как конструктивного элемента. Запас прочности по элементам средней линии не ниже 3,0.

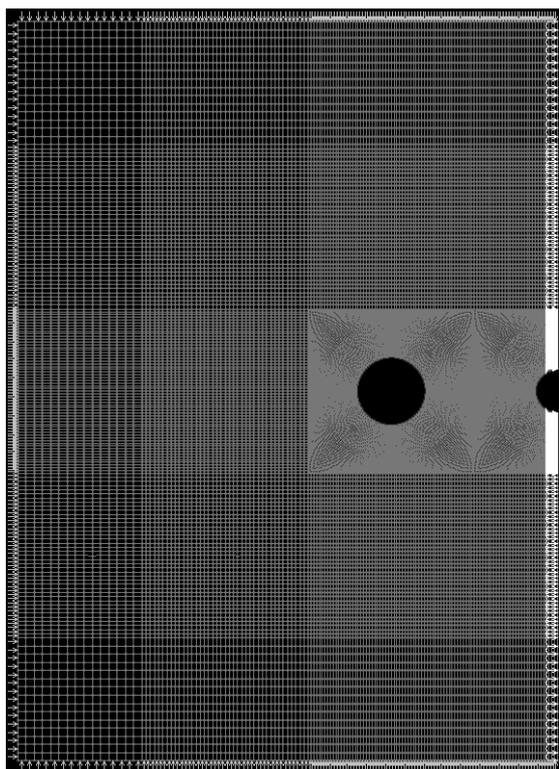


Рис. 2. – Конечно-элементная модель решаемой задачи

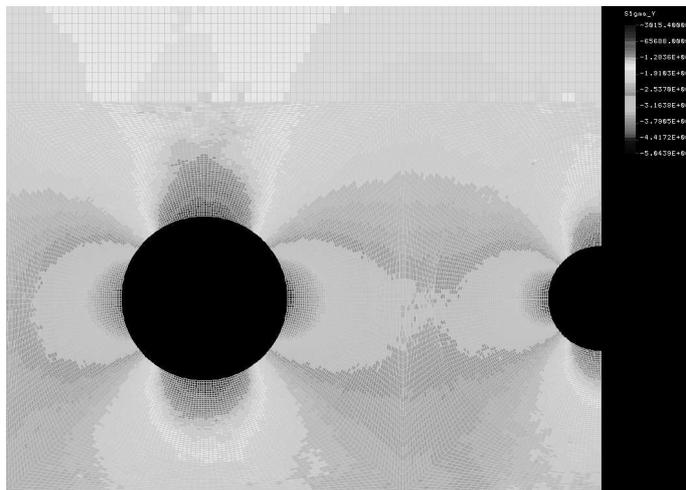


Рис. 3. – Распределение вертикальных напряжений исследуемой области

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента запаса прочности ( $Z$ ) от времени устойчивой работы целика ( $t$ ). Коэффициент запаса прочности, соответствующий времени сохранения несущей способности целиков от 2 до 20 лет, находится в пределах 1,6 – 2,3.

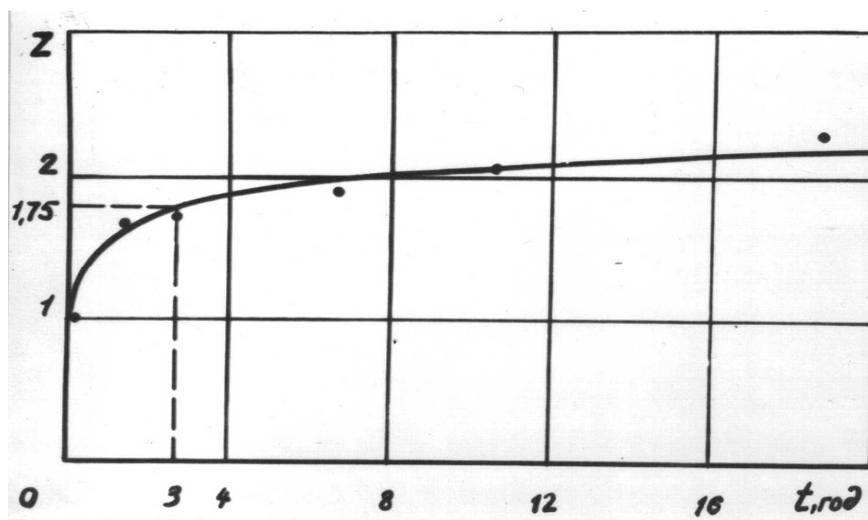


Рис. 4. – Зависимость величины коэффициента запаса прочности ( $Z$ ) от срока службы целика ( $t$ ) (по А.Н. Шашенко [3])

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} 1 = aT^b \\ 2,2 = aT^b \end{cases}$$

Подставим числовые значения:

$$\begin{cases} 1 = a0,1^b \\ 2,2 = a20^b \end{cases}$$

Упростим условия, приведем систему к натуральным логарифмам:

$$\begin{cases} 0 = \ln a + b \ln 0,1 \\ 2,2 = \ln a + b \ln 20 \end{cases}$$

Аналитически график на рис. 4 может быть представлен следующей степенной функцией:

$$Z = aT^b, \quad (5)$$

где коэффициенты аппроксимации равны:  $a = 1,5$ ;  $b = 0,15$ .

Оценка показала, что при расчетной величине запаса прочности  $Z \geq 3$ , подземный переход под Керченским проливом может безопасно эксплуатироваться свыше 400 лет.

**Влияние хрупкости пород на устойчивость целика.** Структура пород оценивается коэффициентом хрупкости, который определяется по формуле:

$$\psi = \frac{R_p}{R_c}, \quad (6)$$

где  $R_p$  – предел прочности пород на одноосное растяжение;  $R_c$  предел прочности пород на одноосное сжатие.

На рис. 5. показано влияние величины  $\psi$  на запас прочности целиков. Из графика видно, что при росте значения величины  $\psi$ , ширина ленточного целика должна линейно увеличиваться.

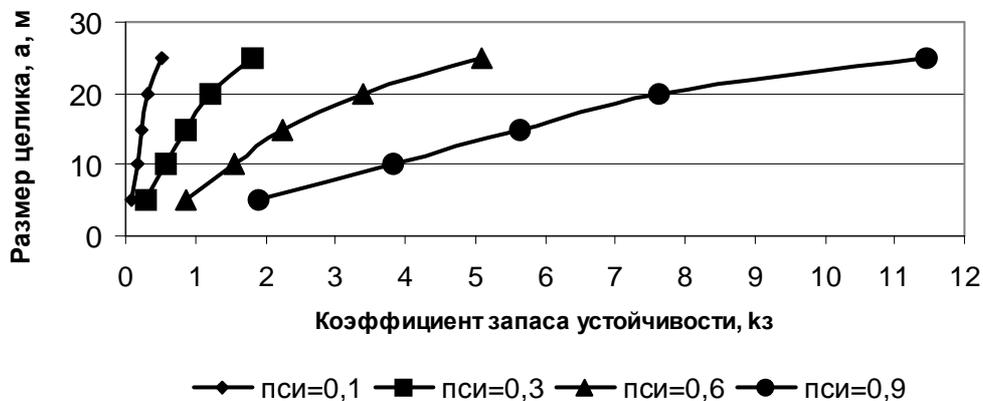


Рис. 5. – График зависимости коэффициента запаса устойчивости  $Z$  от коэффициента хрупкости  $\psi$

Таким образом, точное определение коэффициента хрупкости является важной инженерной и научной задачей. Методика определения этой величины изложена в [2].

**Коэффициент запаса устойчивости целика.** На рис. 6 приведена зависимость коэффициента запаса устойчивости от размеров целика. Значение коэффициента хрупкости  $\psi$  для массива горных пород под Керченским проливом равно 0,6. В ходе исследований принимали различные значения коэффициента хрупкости  $\psi$ : 0,1; 0,3; 0,6; 0,9.

При компьютерном моделировании размеры целиков варьировались от 5 до 25 м с интервалом 5 м.

Из приведенного графика (рис. 6) прослеживается линейная зависимость увеличения коэффициента запаса устойчивости от размеров целика.

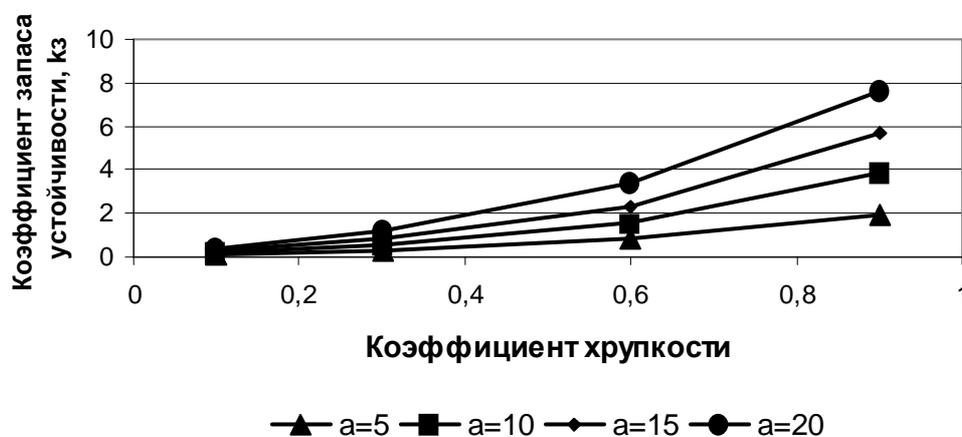


Рис. 6. – График зависимости коэффициента запаса устойчивости  $Z$  от размеров целика  $a$

### Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложена геомеханическая модель предохранительного целика между тоннелями под Керченским проливом.

2. Выполнена оценка прочности целиков при их ширине, изменяющейся от 10 до 30 м.

2. Установлено, что при ширине целика, равной 20 м, срок безопасной эксплуатации тоннеля составит не менее 400 лет.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. Масштабный эффект в горных породах: Монография. – Д.: Арт-пресс, 2004. – 132 с.
2. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография. – Д.: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
3. Шашенко А.Н. Совершенствование камерной системы разработки в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения: Дис...канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1908. – 186 с.