

*Елена Сдвижкова\*, Наталия Хозяйкина\*, Дмитрий Шащенко\**

## ОБОСНОВАНИЕ ШИРИНЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ СООРУЖЕНИИ ПОДЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕХОДА ПОД КЕРЧЕНСКИМ ПРОЛИВОМ

---

### 1. Введение

Геостратегическое расположение Украины позволяет ей быть выгодным мостом для транзитных перевозок товаров и пассажиров между государствами Европы, Азии и Ближнего Востока. Международные и внутренние транспортные потоки требуют создания особых геотехнических систем, которые получили название **транспортных коридоров**. Транспортным коридором называется территория, находящаяся в зоне влияния по обе стороны от магистральных автомобильных и железных дорог международного сообщения, морских и воздушных путей, включая любую связанную с ними инфраструктуру [1]. Создание новых транспортных коридоров и их интеграция в международную транспортную систему является одним из приоритетных направлений развития экономики Украины.

На международной конференции в Клайпеде, состоявшейся в апреле 1999 г, украинская делегация предложила присоединить Евро-Азиатский транспортный коридор к действующим международным коридорам и тем самым создать самый короткий транспортный путь из Европы через Кавказский регион в Среднюю Азию и в страны Ближнего Востока. Реализация этой идеи возможна при условии строительства подземного транспортного перехода под Керченским проливом.

### 2. Обоснование проблемы

Одной из основных задач нового транспортного перехода будет осуществление поставок сухопутным путем нефтепродуктов на европейский рынок. Потенциал указанного

---

\* Национальный Горный Университет, Днепропетровск, Украина

коридора очень высок. Прогнозируемый объем поставок нефти через переход составляет 30 млн. тонн в год.

Подводные тоннели под проливом являются важным элементом транспортных коридоров. Исследования показывают, что для безопасного функционирования подземных переходов под проливами их следует, как правило, сооружать в количестве не менее трех. В пространстве такие тоннели должны быть размещены как можно ближе друг к другу. Это обеспечивает меньшие затраты на создание инфраструктуры как во время строительства, так и во время эксплуатации транспортного подземного перехода. Однако минимальное расстояние между тоннелями ограничивается размерами целиков — нетронутых частей породного массива, оставляемых вдоль тоннелей с целью обеспечения их устойчивости. Такие целики, как конструктивные элементы геомеханической системы «тоннель-породный массив-тоннель», должны иметь определенный запас прочности, обеспечивающий ее функционирование в течении длительного промежутка времени, измеренного сотнями лет.

В данной работе изложена методика определения такой достаточной ширины предохранительных целиков, при которой обеспечивается многолетняя безопасная эксплуатация подземного перехода. Исследования выполнены применительно к горно-геологическим условиям дна Керченского пролива. Технический проект выполнен научно-производственной фирмой ЭСПО (г. Симферополь).

### 3. Обоснование расчетной схемы объекта

Исследуемый объект — подземный транспортный переход — представляет собой три параллельных тоннеля круглого поперечного сечения, проходящих под дном Керченского пролива. Боковые тоннели имеют диаметр 7,6 м, центральный (вспомогательный) — 5,4 м (рис.1).

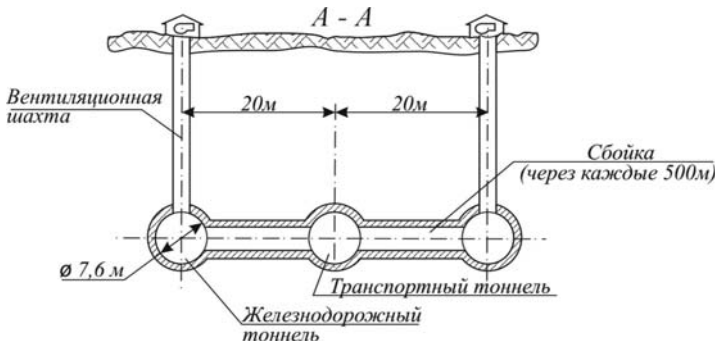


Рис. 1. Схема профиля тоннелей подземного транспортного перехода

Между тоннелями располагаются ленточные предохранительные целики шириной  $a$ , обеспечивающие длительную сохранность транспортного перехода. Тоннели заложены на глубине 110 м от поверхности воды в проливе в плотных глинах. Физико-

механические характеристики глин имеют следующие значения: пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение  $R_c = 22$  МПа,  $R_p = 2,0$  МПа соответственно, модуль упругости  $E = 240$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,37$ , объемный вес  $\gamma = 2,48$  т/м<sup>3</sup>.

Сечение породного массива плоскостью, перпендикулярной к продольной оси тоннеля представлено на рисунке 2. Верхняя часть модели представлена слоем морской воды (высота слоя  $H_6 = 6$  м, объемный вес  $\gamma_0 = 1,1$  т/м<sup>3</sup>). Под слоем воды располагается природный ил (высота слоя  $H_u = 14$  м, объемный вес  $\gamma_u = 1,1$  т/м<sup>3</sup>). Ниже находятся плотные глины, в которых размещены тоннели.

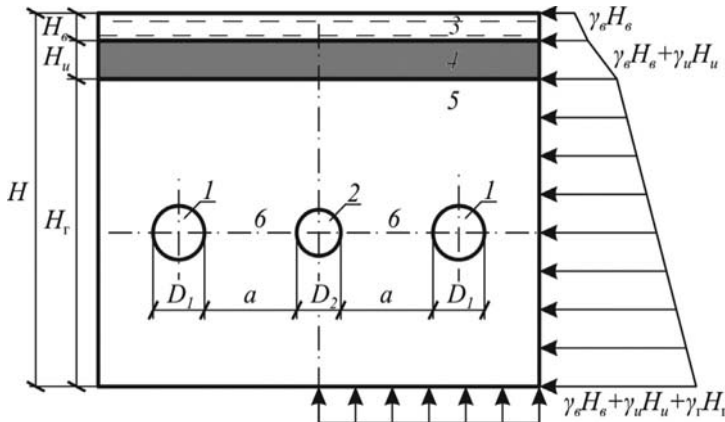


Рис. 2. Расчетная схема объекта:

- 1 — транспортные тоннели, 2 — вспомогательный тоннель, 3 — вода в проливе,  
4 — природный ил, 5 — плотные глины, 6 — целики

#### 4. Оценка прочности целика

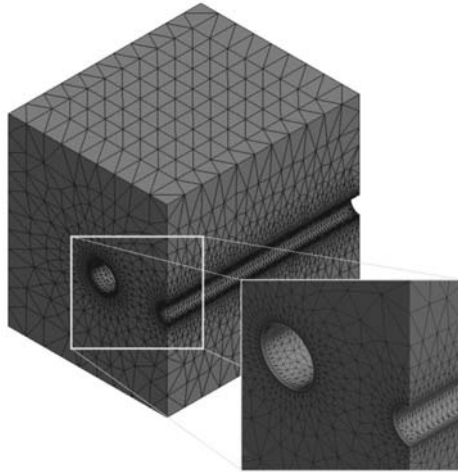
Задача оценки прочности ленточных предохранительных целиков состоит из трех частей:

- определение напряжений в каждой точке целика,
- определение предельной несущей способности горных пород, слагающих целик,
- установление некоторого интегрального значения коэффициента запаса прочности и сравнения его с нормативным значением.

Решение первой задачи выполняется в наиболее общем виде, то есть исследуется напряженно-деформированное состояние геомеханической системы «массив-тоннель-целик». Используется метод конечных элементов, размер исследуемой области  $65 \times 90 \times 90$  м что, принимая во внимание размер тоннелей, исключает влияние краевых эффектов.

Симметричное расположение трех тоннелей дает возможность рассматривать только половину области. Отброшенная часть жестко закрепляется без возможности перемещаться вдоль оси горизонтальной оси. Боковой распор  $\lambda = \mu / (1 - \mu)$  принят равным

единице, поскольку сравнительно мягкие влажные глины со временем принимают свойства тяжелой вязкой жидкости. Породная среда принимается упругой, весомой.



**Рис. 3.** Конечно-элементная схема исследуемой области

Вторая задача связана с оценкой прочности горных пород, находящихся в сложном напряженном состоянии, и выполняется на основе той или иной теории прочности. В работе [2] изложены принципы перехода от трехмерного напряженного состояния, характеризующегося тремя компонентами главных напряжений —  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , к эквивалентному одноосному  $\sigma_e$ , что позволяет легко определить степень опасности действующих напряжений (в смысле разрушения конструкции) путем сравнения эквивалентных напряжений с пределом прочности на одноосное сжатие —  $R_c$ . Условие разрушения горных пород в произвольной точке исследуемой области имеет вид:

$$\sigma_e \geq R_c \tag{1}$$

Анализ наиболее известных в геомеханике теорий прочности, позволяющих перейти от сложного напряженного состояния к эквивалентному состоянию, показал, что для оценки прочности большинства горных пород в наибольшей степени подходит теория прочности П.П. Баландина, которая для случая трехосного напряженного состояния записывается следующим образом:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{2\psi} + \frac{\sqrt{(\psi - 1)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 4\psi[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}{2\psi} \tag{2}$$

Здесь:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения,  
 $\Psi$  — коэффициент хрупкости ( $\Psi = R_p/R_c$ ),  
 $R_p$  — предел прочности горных пород на одноосное растяжение.

Из (1) следует, что исследуемая величина — коэффициент запаса прочности — может быть определена следующим образом:

$$k_c(x) = \frac{R_c k_c}{\sigma_e(x)} \quad (3)$$

где  $k_c(x)$  и  $\sigma_e(x)$  — исследуемые величины, изменяющиеся по ширине целика  $a$  ( $0 \leq x \leq a$ ).

Важной задачей является определение интегрального коэффициента запаса прочности целика. Зависимость (3) может быть аппроксимирована некоторой непрерывной на отрезке  $(0, a)$  функцией  $k(x)$ . Согласно теореме о среднем, в этом случае внутри рассматриваемого отрезка всегда найдется точка  $C$ , такая, что:

$$\int_0^a k(x) dx = k(C)a \quad (4)$$

Тогда среднее значение функции  $k(x)$  на отрезке  $[0, a]$  равно:

$$\overline{k(x)} = \frac{1}{a} \int_0^a k(x) dx \quad (5)$$

Величина (5) определяет собой среднее значение запаса прочности целика шириной  $a$ . Сравнение его с нормативом является основой для принятия проектного решения.

## 5. Результаты численного моделирования

В расчетах ширина целиков между тоннелями варьировалась от 5 до 25 м с шагом 5 м. Анализ напряжений в окрестности исследуемых выработок (например, вертикальных напряжений  $\sigma_y$ ) показывает, что их распределение вдоль ширины целика несимметрично (рис. 4). Это вызвано тем, что диаметры тоннелей неодинаковы. Область больших эквивалентных напряжений смещена в сторону большего тоннеля. Аналогично распределены и другие компоненты тензора напряжений, а следовательно, и эквивалентные напряжения (2) (рис. 5).

Характерный вид функции  $k(x)$  для целика шириной 20 м показан на рисунке 6. В самом общем виде эта функция может быть аппроксимирована полиномом 5-й степени с коэффициентом корреляции  $r = 0,9978$ . Тогда среднее значение в соответствии с (5) будет равно.

$$\overline{k(x)} = \frac{1}{a} \int_0^a \left( \sum_{n=0}^5 a_n x^n \right) dx \quad (6)$$

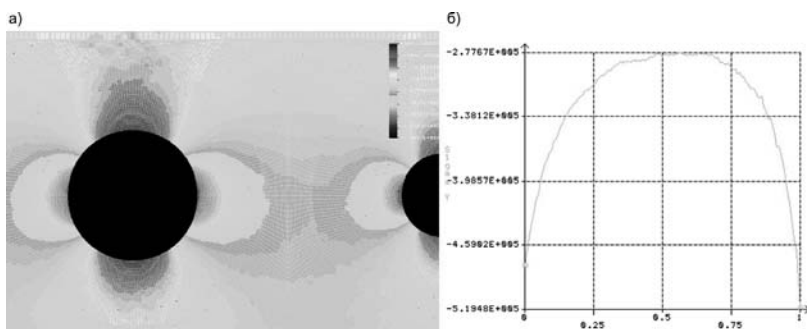


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$ : а) в окрестности тоннелей, б) вдоль средней линии щелика при ширине  $a = 20$  м

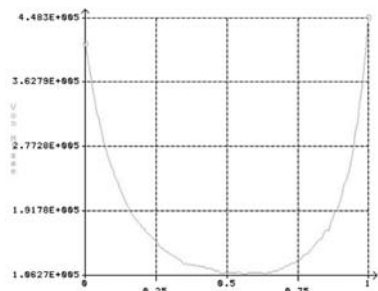


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  вдоль средней линии щелика при ширине  $a = 20$  м

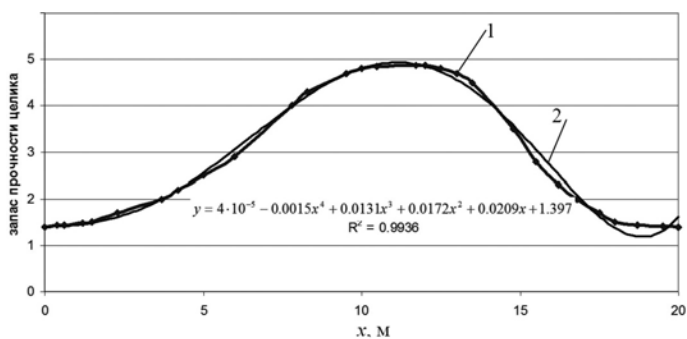
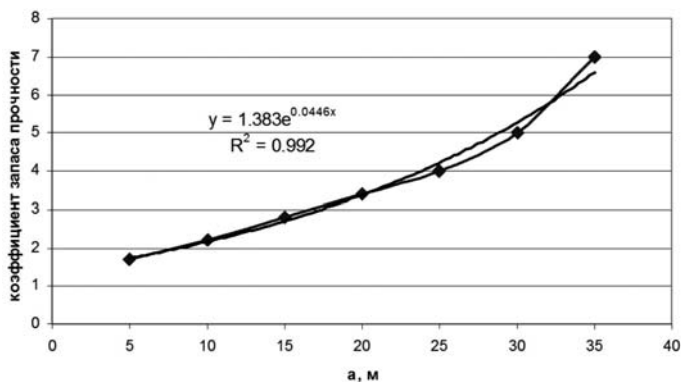


Рис. 6. Изменение запаса прочности  $k(x)$  по ширине щелика (кривая 1) и его аппроксимация (кривая 2)

На рисунке 7 показана зависимость  $\overline{k(x)}$  от ширины ленточного щелика, из которой следует, что среднее значение запаса прочности для щелика шириной 20 м равно 3,43.



**Рис. 7.** Зависимость среднего значения коэффициента запаса прочности  $\bar{k}(x)$  от ширины ленточного целика

Для того чтобы установить, достаточен ли такой запас прочности целика для длительной эксплуатации проектируемых тоннелей необходимо либо располагать соответствующей нормативной базой либо выполнить анализ условий — аналогов. Нормативная база на настоящий момент не разработана в полном объеме. Достаточно большой опыт эксплуатации выработок, разделенных ленточными целиками, накоплен при отработке месторождений калийной соли. В течение многих лет сотрудниками НГУ изучалась «in situ» фактическая прочность целиков на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей. Калийная соль (сильвинит, карналлит) обладает невысокой прочностью, составляющей, примерно, 20 МПа, и ярко выраженными реологическими свойствами. Такими же, или очень близкими, свойствами обладают плотные влажные глины, в которых будут сооружаться проектируемые тоннели. Для условий указанного месторождения установлена зависимость коэффициента запаса прочности целиков от времени:

$$\bar{k}_z = 1 + aT^b \quad (7)$$

где  $a, b$  — коэффициенты, зависящие от свойств пород.

Для целиков, оставляемых в массиве калийной соли  $a = 1,15, b = 0,13$ . Полагая, что такая же закономерность сохраняется для плотных влажных глин получим, что при значении  $\bar{k}_z = 3,43$  время безопасной эксплуатации целика составит 300–350 лет.

## 6. Выводы

- 1) Предложена методика оценки прочности целиков между тоннелями проектируемого транспортного коридора под Керченским проливом.
- 2) Получена зависимость интегрального коэффициента запаса прочности целика от его ширины, позволяющая оценить несущую способность целика.

- 3) На основе численного моделирования и применения разработанной методики сделан вывод, что для рассматриваемых горно-геологических и горно-технических условий длительная устойчивость целиков между тоннелями будет обеспечена при ширине целиков 20 м.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Kisilev V.V.*: Tranzitnyj potencial Ukrainy: problemy i perspektivy. — Izv-ja Har'kovskogo nac. un-ta im. V.N. Karazina, № 11, 2008, s. 12–17
- [2] *Shashenko A.N., Sdvyzhkova E.A., Gapeev S.N.*: Deformiruemost' i prochnost' massivov gornyh porod: Monografija, Nacional'nyj gornyj universitet, 2008, s. 224