

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191.8:539.38

В. П. КОЖУШКО<sup>1\*</sup>, С. Н. КРАСНОВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости, конструкции и строительная механика» Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, Украина, 61002, тел. (057) 707 37 22, эл. почта kmksm@ukr.net, ORCID 0000-0002-7044-776X

<sup>2</sup> Кафедра «Мости, конструкции и строительная механика» Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, Украина, 61002, тел. (097) 214 54 09, эл. почта krasnov56@ukr.net, ORCID 0000-0002-2375-4273

### АНАЛИЗ РАБОТЫ ЛОТКОВОГО ЭЛЕМЕНТА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ ПЕШЕХОДНОГО ТОННЕЛЯ

**Цель.** Определить распределение реактивных давлений и изгибающих моментов в лотковом элементе, контактирующим с грунтовым основанием, описываемом различными моделями грунта при разных показателях гибкости системы «полоса-грунт». **Методика.** Расчет произведен по методике, разработанной одним из авторов, который составит обширные таблицы единичных реактивных усилий от разных поперечно приложенных внешних нагрузок и пригрузок. **Результаты.** Построены эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов в лотковой полосе в зависимости от принимаемой модели грунта и показателя гибкости системы «полоса-грунт». При определении внутренних усилий (изгибающих моментов и поперечных сил) использована ступенчатая эпюра по Жемочкину и Синицыну (в пределах каждого участка разбивки интенсивность давления постоянна и равна давлению под серединой участка). Анализ результатов расчета показал, что по форме эпюры реактивного давления значительно отличаются от формы эпюры, полученной без учета совместной работы лотка с грунтом. Изгибающие моменты в среднем сечении полосы значительно больше по величине от моментов, полученных при расчетах без учета совместной работы ее с грунтовым основанием, а отрицательные моменты по модулю имеют меньшие значения. Полученные при комбинированной модели грунта результаты несколько отличаются от таковых при расчете полосы на линейно-деформируемой полуплоскости. **Научная новизна.** Получена возможность прогнозирования работы лоткового элемента тоннеля, при изменении его изгибной жесткости и физико-механических характеристик грунта. **Практическая ценность.** В результате применения рассматриваемой методики расчета будет сэкономлено определенное количество бетона и арматуры.

**Ключевые слова:** эпюра реактивных давлений; эпюра изгибающих моментов; линейно-деформируемая полуплоскость; линейно-деформируемый слой конечной толщины; винклеровское основание; комбинированная модель; показатель гибкости «полоса-грунт»

#### Введение

Прямоугольные обделки пешеходных тоннелей, контактируя по контуру с грунтовым массивом, работают совместно с грунтом, т.к. грунт является не только нагрузкой, но и средой, которая воспринимает какую-то долю усилий, возникающих в процессе деформации обделки от внешних нагрузок.

Задача определения реактивных давлений со стороны грунта на обделку является сложнейшей задачей теории упругости. Большие трудности вызывает решение задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) обделки и в математическом плане. НДС системы зависит от жесткостных характеристик элементов обде-

лки и от используемой при расчетах модели грунта.

В ряде литературных источников приведены результаты расчета тоннельных обделок прямоугольного очертания, работающих совместно с грунтом. В работе Симвулиди (1987) предложена модель грунта в виде линейно-деформируемой полуплоскости как в районе лотка, так и в районе контакта боковых стенок с грунтом, что не совсем корректно, поскольку вертикально и горизонтально расположенные грунтовые слои по-разному работают при передаче на них внешних нагрузок.

Горбунов-Посадов, Маликова & Соломин (1984) исследовали работу только лоткового элемента обделки, совместно работающего с

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

грунтом. Расчет только лоткового элемента с грунтом приведен и в программном продукте «Ли́ра». В работах Мейза (1974); Одена (1976); Лучковского (2000); Stefanov (2009); Kissl (2011); Pereira, & Caldeira (2011); Винникова, Харченка, & Марченка (2012); Тютюкіна, & Мірошника (2012); Петренка, Тютюкіна, & Кулаженка (2014) разработаны и иные модели грунта, но при исследовании работы лоткового элемента совместно с грунтом они не применялись.

Нами был предложен расчет прямоугольной обделки (Кожушко, 1972); Кожушко, 1974), все элементы которой контактируют с грунтом, описываемом комбинированными моделями грунта. В районе лотка и перекрытия была предложена модель грунта в виде винклеровского слоя, лежащего на линейно-деформируемой полуплоскости, а в районе боковых стенок – комбинированная модель в виде винклеровского слоя, лежащего на линейно-деформируемой четвертьплоскости.

Поскольку НДС системы в значительной степени зависит от применяемой модели грунтового массива, то интересным и не вполне исследованным является вопрос о влиянии применяемой модели грунта и жесткостных параметров обделки на распределение усилий в системе. В данной работе поставлена более скромная задача исследования работы только лоткового элемента при различных моделях грунта и при различном показателе гибкости системы «полоса-грунт» (Кожушко (1990)).

### Цель

Цель заключается в анализе результатов расчета лоткового элемента двухпролетного пешеходного тоннеля совместно с грунтовым основанием, описываемом разными моделями грунта (линейно-деформируемой полуплоскостью, линейно-деформируемым слоем конечной толщины, основанием Винклера и комбинированной моделью в виде винклеровского слоя, лежащего на линейно-деформируемой полуплоскости (Жемочкин, & Сеницын, 1962), при различных показателях гибкости  $\alpha$  системы «лоток-грунт» (Жемочкин, & Сеницын, 1962; Кожушко, 1974).

### Методика

Для анализа совместной работы лоткового

элемента с грунтом использована методика расчета полос на линейно-деформируемом основании, изложенная в работе Кожушко (1990). Основой этого расчета являются предложения Жемочкина, & Сеницына (1962), которые, как известно, заменили сложные решения теории упругости методами строительной механики, применив при этом смешанный метод расчета. Как и в указанной работе, нами полоса делится на 5 равных участков, что как показано в источнике Жемочкиным, & Сеницыным (1962), достаточно для получения приемлемых для практики результатов. Одним из авторов этой статьи были составлены обширные таблицы единичных реактивных усилий от различных внешних нагрузок и пригрузок для различных показателей гибкости  $\alpha$  системы «полоса-грунт» (Жемочкин, & Сеницын, 1962; Кожушко, 1990). Принятая в расчетах модель грунта – это линейно-деформируемый слой конечной толщины (Крашенинникова, 1964), поэтому таблицы составлены для относительной толщины  $c/H$  слоя, изменяющиеся от  $1/32$  до  $4$ , где  $c$  – длина разбивки полосы (в данном случае равна  $l/5$ ,  $l$  – длина полосы);  $H$  – толщина деформируемого слоя грунта. Анализ этих таблиц показал, что при относительной толщине сжимаемого слоя равного  $1/32 - 1/16$ , полоса работает как элемент на линейно деформируемой полуплоскости. Эти данные совпадают с результатами расчета по методам, изложенным в работах Жемочкина, & Сеницына (1962); Горлова & Серебряного (1968); Попова (1982); Горбунов-Посадова, Маликовой & Соломина (1984); Симвулиди (1987). При толщине слоя, равного  $1/8 - 1$ , полоса ведет себя как элемент, контактирующий с линейно-деформируемым слоем конечной толщины.

Это подтверждается анализом результатов расчета, приведенным в работе Крашенинниковой (1964). При относительной толщине слоя  $c/H > 2$ , результаты расчета совпадают с решениями полос на основании Винклера (Клепиков, 1967; Симвулиди, 1987).

Таким образом, используя таблицы работы Кожушко (1972), можно проанализировать работу полос на грунтовом основании для трех моделей грунта: линейно-деформируемой полуплоскости, линейно-деформируемого слоя конечной толщины и винклеровского основания при расчетных показателях гибкости си-

стемы «полоса-грунт», изменяющемуся от  $\alpha=0$  (жесткая полоса) до  $\alpha=0,427$  (короткая полоса).

### Результаты

Исследуем работу полосы шириной 1 м, нагруженной системой внешних поперечных сил и концевыми моментами (рис. 1). Под такими нагрузками работает лотковый элемент двухпролетной обделки пешеходного тоннеля.

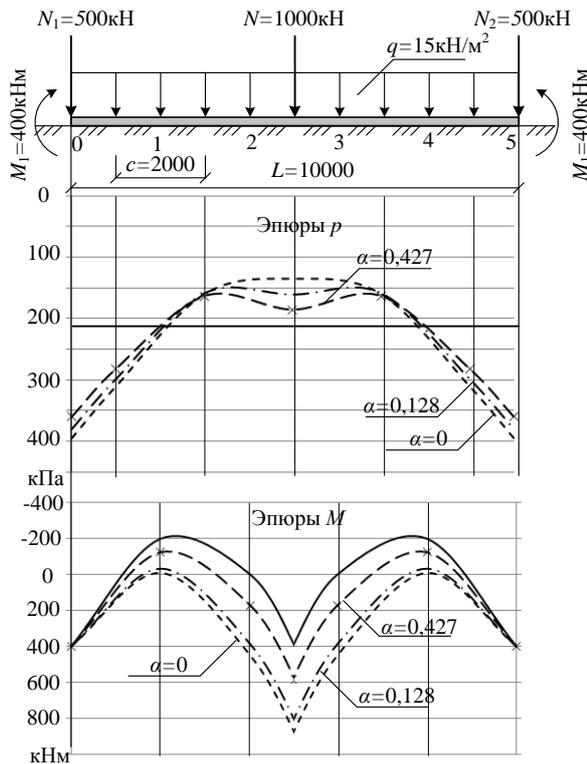


Рис. 1. Эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов ( $c/H=1/32$ )

При неучете совместной работы полосы с грунтом эпюра реактивных давлений представляет собой равномерно распределенную нагрузку (рис. 1, сплошная линия). Интенсивность этой нагрузки

$$p = \frac{\sum N}{A} + q = \frac{2000}{10 \cdot 1} + 15 = 215 \text{ кПа.}$$

В этом случае изгибающие моменты будут равны

$$\begin{aligned} M_0 &= 400 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_1 &= 400 + 215 \cdot 2 \cdot 1 - 500 \cdot 2 - 15 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 = -200 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_2 &= 400 + 215 \cdot 4 \cdot 2 - 500 \cdot 4 - 15 \cdot 4 \cdot 2 = 0 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_{2,3} &= 400 + 215 \cdot 5 \cdot 2,5 - 500 \cdot 5 - 15 \cdot 5 \cdot 2,5 = 400 \text{ кН}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Определим реактивные давления и значения изгибающих моментов в лотке при  $c/H=1/32$ , и  $\alpha=0$  т.е. оценим работу жесткой полосы на линейно деформируемой полуплоскости. Из таблиц работы Кожушко (1990) позаимствуем значения единичных реактивных усилий  $\bar{Y}_i$ . Они равны:

от распределенной нагрузки единичной интенсивности

$q_1=qc=1$	$q_2=qc=1$	$q_3=qc=1$
$\bar{Y}_1 = 0,7391;$	$0,5140;$	$0,2888;$
$\bar{Y}_2 = 0,2428;$	$0,1930;$	$0,1433;$
$\bar{Y}_3 = 0,1358;$	$0,1358;$	$0,1358;$
$\bar{Y}_4 = 0,0437;$	$0,0935;$	$0,1433;$
$\bar{Y}_5 = -0,1614;$	$0,0637;$	$0,2880;$

$q_4=qc=1$	$q_5=qc=1$
$0,0637;$	$-0,1614;$
$0,0935;$	$0,0437;$
$0,1358;$	$0,1358;$
$0,1930;$	$0,2428;$
$0,5140;$	$0,7391.$

от единичных сосредоточенных сил

$N_1/b=1$	$N/b=1$	$N_2/b=1$
$\bar{Y}_1 = 0,8516;$	$0,2888;$	$-0,2739;$
$\bar{Y}_2 = 0,2677;$	$0,1433;$	$0,0189;$
$\bar{Y}_3 = 0,1357;$	$0,1358;$	$0,1357;$
$\bar{Y}_4 = 0,0189;$	$0,1433;$	$0,2677;$
$\bar{Y}_5 = -0,2739;$	$0,2888;$	$0,8516.$

от единичных концевых моментов

$M_1/bc=1$	$M_2/bc=1$
$\bar{Y}_1 = -0,2251$	$0,2251;$
$\bar{Y}_2 = -0,0498;$	$0,0498;$
$\bar{Y}_3 = 0;$	$0;$
$\bar{Y}_4 = 0,0498;$	$-0,0498;$
$\bar{Y}_5 = 0,2251;$	$-0,2251.$

Для определения реактивных давлений под серединами участков разбивки полосы воспользуемся формулами, приведенными в работе Кожушко (1990):

от распределенной нагрузки

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$p_q = q \sum_{n=1}^5 \bar{Y}_i = 15 \sum_{n=1}^5 \bar{Y}_i;$$

от сосредоточенных сил  $N_1$  и  $N_2$

$$p_{N_i} = 5 \frac{N_i}{b \cdot l} \bar{Y}_i;$$

при действии концевых сил  $N_1=500$  кН или  $N_2=500$  кН

$$p_{N_i} = 5 \frac{500}{1 \cdot 10} \cdot \bar{Y}_i = 250 \cdot \bar{Y}_i;$$

при действии силы, приложенной посередине  $N=1000$  кН,

$$p_{N_i} = 5 \frac{1000}{1 \cdot 10} \cdot \bar{Y}_i = 500 \cdot \bar{Y}_i;$$

от концевых моментов  $M_1=400$  кН·м или  $M_2=400$  кН·м

$$p_{M_i} = 25 \frac{M}{b \cdot l^2} \bar{Y}_i = 25 \frac{400}{1 \cdot 10^2} \cdot \bar{Y}_i = 100 \cdot \bar{Y}_i.$$

Реактивные давления под серединами участков разбивки полосы

$$p_1 = p_5 = (0,7391 + 0,5140 + 0,2888 + 0,0637 - 0,1614) \cdot 15 + 250(0,8516 - 0,2739) + 500 \cdot 0,2888 + 100(-0,2251 + 0,2251) = 310,485 \text{ кПа};$$

$$p_2 = p_4 = (0,2428 + 0,1930 + 0,1433 + 0,0935 + 0,0437) \cdot 15 + 250 \cdot (0,2677 + 0,0189) + 500 \cdot 0,1433 + 100 \cdot (-0,0498 + 0,0498) = 154,04 \text{ кПа};$$

$$p_3 = 0,1358 \cdot 5 \cdot 15 + 250 \cdot 0,1357 \cdot 2 + 500 \cdot 0,1358 + 100 \cdot 0 = 145,935 \text{ кПа}.$$

Эпюра реактивных давлений на рис. 1 показана пунктирной линией. По Жемочкину & Синицыну (1962) эпюра реактивных давлений – ступенчатая (в пределах каждого участка разбивки интенсивность давления постоянна и равна давлению под серединой участка). При определении внутренних усилий (изгибающих моментов и поперечных сил) следует использовать ступенчатую эпюру (Жемочкин & Синицын, 1962).

Тогда изгибающие моменты под точками 0, 1, 2, 3, 4 и 5 будут иметь следующие значения:

$$M_0=400 \text{ кН·м};$$

$$M_1=400-500 \cdot 2-15 \cdot 2 \cdot 1+310,485 \cdot 2 \cdot 1=-9,3 \text{ кН·м};$$

$$M_2=400-500 \cdot 4-15 \cdot 4 \cdot 2+310,485 \cdot 2 \cdot 3+154,04 \cdot 2 \cdot 1=450,99 \text{ кН·м};$$

$$M_{2,3}=400-500 \cdot 5-15 \cdot 5 \cdot 2,5+310,485 \cdot 2 \cdot 4+154,04 \cdot 2 \cdot 2+145,935 \cdot 1 \cdot 0,5=885,51 \text{ кН·м}.$$

На рис. 1 эпюра изгибающих моментов нанесена пунктирной линией.

Аналогичные кривые реактивного отпора и изгибающих моментов построены при показателях гибкости системы «полоса-грунт»  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$ . Для решения задачи для этих  $\alpha$  следует из таблиц работы Кожушко (1990) выписать единичные реактивные усилия и по изложенной выше методике определить реактивные давления и изгибающие моменты:

при  $\alpha=0,128$

$$p_1=p_5=298,46 \text{ кПа};$$

$$p_2=p_4=158,595 \text{ кПа};$$

$$p_3=160,95 \text{ кПа};$$

$$M_0=400 \text{ кН·м}; M_1=-33,08 \text{ кН·м};$$

$$M_2=387,95 \text{ кН·м}; M_{2,3}=815,035 \text{ кН·м};$$

при  $\alpha=0,427$

$$p_1=p_5=281,83 \text{ кПа};$$

$$p_2=p_4=163,112 \text{ кПа};$$

$$p_3=185,11 \text{ кПа};$$

$$M_0=400 \text{ кН·м}; M_1=-66,34 \text{ кН·м};$$

$$M_2=297,22 \text{ кН·м}; M_{2,3}=712,175 \text{ кН·м}.$$

На рис. 1 штрих-пунктирными линиями показаны эпюры при  $\alpha=0,128$ , прерывистыми линиями с крестиками – при  $\alpha=0,427$ .

Анализ результатов этого расчета показал, что по форме эпюры реактивного давления значительно отличаются от формы эпюры, полученной без учета совместной работы лотка с грунтом. Под серединой полосы давления на грунт уменьшаются, а под концами полосы – увеличиваются. Изгибающие моменты в среднем сечении полосы значительно больше по величине от моментов, полученных при расчетах без учета совместной работы ее с грунтовым основанием, а отрицательные моменты по модулю имеют меньшие значения.

Проанализируем работу этой же полосы при относительной толщине сжимаемого слоя  $c/H=0,5$ . Расчет полосы произведем при тех же показателях гибкости системы  $\alpha=0$ ;  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$ . Напомним, что аналогичные показатели гибкости по М. И. Горбунову-Посадову  $t=0$ ; 3 и 10.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Произведя по выше изложенной методике расчеты, получим следующие значения реактивных давлений и изгибающих моментов:

- при  $\alpha=0$   
 $p_1=p_5=252,84$  кПа;  $p_2=p_4=187,54$  кПа;  
 $p_3=194,255$  кПа;  
 $M_0=400$  кН·м;  $M_1=-124,32$  кН·м;  
 $M_2=172,12$  кН·м;  $M_{2-3}=582,51$  кН·м;
- при  $\alpha=0,128$   
 $p_1=p_5=249,53$  кПа;  $p_2=p_4=187,355$  кПа;  
 $p_3=201,31$  кПа;  
 $M_0=400$  кН·м;  $M_1=-130,94$  кН·м;  
 $M_2=151,89$  кН·м;  $M_{2-3}=558,815$  кН·м;
- при  $\alpha=0,427$   
 $p_1=p_5=245,66$  кПа;  $p_2=p_4=184,845$  кПа;  
 $p_3=213,97$  кПа;  
 $M_0=400$  кН·м;  $M_1=-138,68$  кН·м;  
 $M_2=123,65$  кН·м;  $M_{2-3}=524,145$  кН·м.

Из рис. 2 видно, что при относительной толщине слоя  $c/H=0,5$  форма эпюр реактивных давлений и изгибающих моментов при различных величинах  $\alpha$  изменяется незначительно, хотя ординаты изменяются существенно.

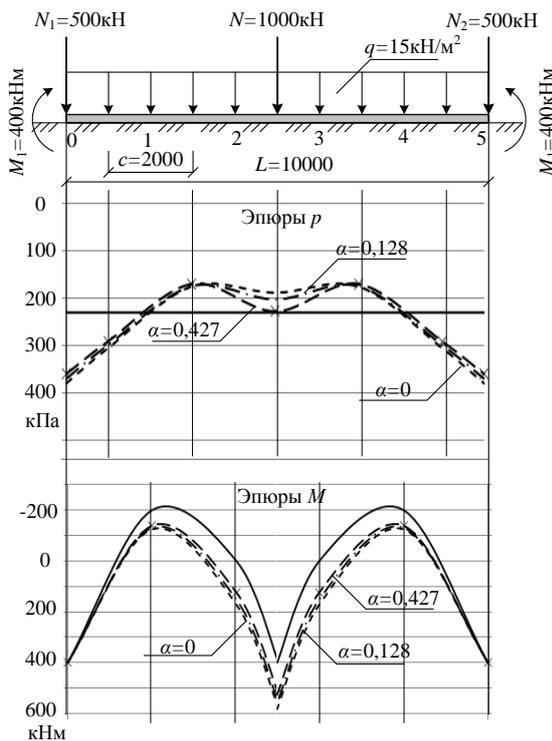


Рис. 2. Эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов ( $c/H=0,5$ )

При  $c/H=4$  грунтовый массив работает как винклеровское основание.

Проанализируем работу системы «полоса –

грунт» при прежних показателях гибкости  $\alpha=0$ ;  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$ .

При показателе гибкости  $\alpha=0$  полоса работает точно также, как и при неучете ее совместной работы с грунтом.

Результаты расчета, полученные при показателях  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$  следующие:

- при  $\alpha=0,128$   
 $p_1=p_5=223,205$  кПа;  $p_2=p_4=204,455$  кПа;  
 $p_3=219,67$  кПа;  
 $M_0=400$  кН·м;  $M_1=-183,59$  кН·м;  
 $M_2=28,14$  кН·м;  $M_{2-3}=425,795$  кН·м;
- при  $\alpha=0,427$   
 $p_1=p_5=231,085$  кПа;  $p_2=p_4=186,625$  кПа;  
 $p_3=239,58$  кПа;  
 $M_0=400$  кН·м;  $M_1=-167,83$  кН·м;  
 $M_2=39,76$  кН·м;  $M_{2-3}=427,47$  кН·м.

Эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов при  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$  практически совпадают (рис. 3).

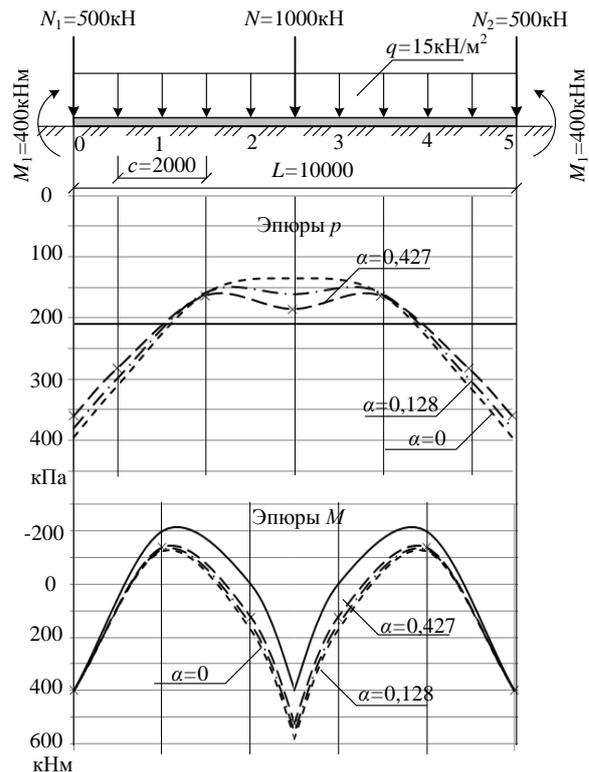


Рис. 3. Эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов ( $c/H=4$ )

Рассмотрим полосу на комбинированном основании (Кожушко,1972; Кожушко,1974) в виде винклеровского слоя, лежащего на линейно-деформируемой полуплоскости при показа-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

телях гибкости системы  $\alpha=0$ ;  $\alpha=0,128$  и  $\alpha=0,427$ .

Относительную толщину винклеровского слоя примем  $\xi=0,30$ . Значения реактивных давлений и изгибающих моментов будут иметь следующие значения (рис. 4):

при  $\alpha=0,128$

$$p_1=p_5=262,255 \text{ кПа}; p_2=p_4=186,79 \text{ кПа};$$

$$p_3=176,93 \text{ кПа};$$

$$M_0=400 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_1=-105,5 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_2=227,1 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_{2,3}=646,2 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

при  $\alpha=0,427$

$$p_1=p_5=256,55 \text{ кПа}; p_2=p_4=187,845 \text{ кПа};$$

$$p_3=186,205 \text{ кПа};$$

$$M_0=400 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_1=-116,90 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_2=194,99 \text{ кН}\cdot\text{м}; M_{2,3}=609,38 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

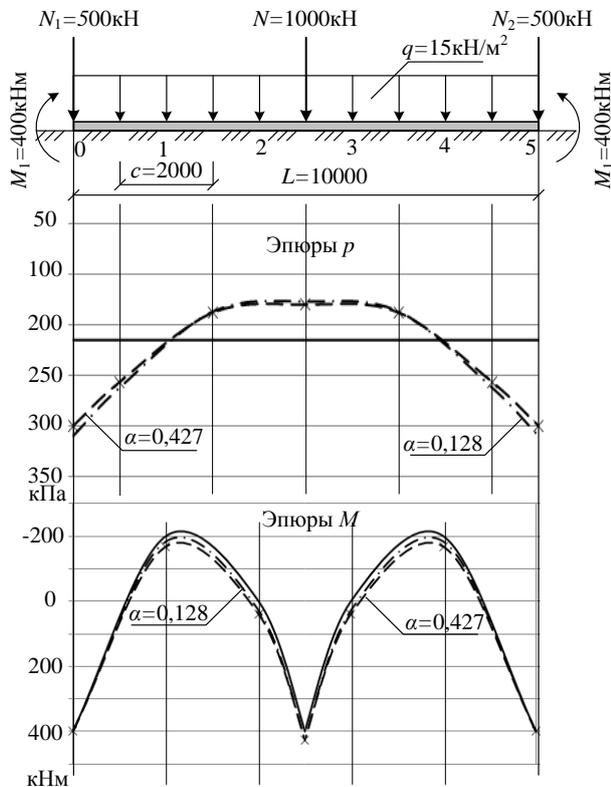


Рис. 4. Эпюры реактивных давлений и изгибающих моментов (комбинированная модель,  $\xi=0,30$ )

Полученные при комбинированной модели грунта результаты несколько отличаются от таковых при расчете полосы на линейно-деформируемой полуплоскости.

Результаты расчетов по 4-м моделям грунта при разных значениях показателя гибкости сведены в таблицы 1, 2, 3 и 4.

Таблица 1

## Реактивные давления под серединой полосы, кПа

$c/H$	Без учета совместной работы	$\alpha=0$	$\alpha=0,128$	$\alpha=0,427$
1/32	215	145,9	160,9	185,1
1/2	215	194,3	201,3	214,0
4	215	215	219,7	239,6
Комбинированная модель	215	–	176,9	186,2

Таблица 2

## Реактивные давления под серединой крайнего участка разбивки, кПа

$c/H$	Без учета совместной работы	$\alpha=0$	$\alpha=0,128$	$\alpha=0,427$
1/32	215	310,5	298,5	281,8
1/2	215	252,8	249,5	245,7
4	215	215	223,2	231,1
Комбинированная модель	215	–	262,3	256,6

Таблица 3

## Изгибающие моменты в среднем сечении полосы, кН·м

$c/H$	Без учета совместной работы	$\alpha=0$	$\alpha=0,128$	$\alpha=0,427$
1/32	400	885,3	815,0	712,2
1/2	400	582,5	558,8	524,1
4	400	400	425,8	427,5
Комбинированная модель	400	–	646,2	609,4

Таблица 4

**Изгибающие моменты в точке 1 участка разбивки, кН·м**

$c/H$	Без учета совместной работы	$\alpha=0$	$\alpha=0,128$	$\alpha=0,427$
1/32	-200	-9,0	-33,1	-66,3
1/2	-200	-124,3	-130,9	-138,7
4	-200	-200	-183,6	-167,8
Комбинированная модель	-200	–	-105,5	-116,9

**Выводы**

1. При применении любой из рассматриваемых моделей грунта эпюры реактивных давлений для большинства показателей гибкости системы «полоса – грунт» резко отличаются от таковых, построенных без учета совместной работы полосы и грунта.

2. Под серединой полосы давления при учете совместной работы полосы и грунта в зависимости от величины  $\alpha$  могут уменьшаться в 1,47 раза или увеличиваться в 1,11 раза.

3. Под серединой первого участка разбивки реактивные давления при рассмотрении любой модели грунта и любом показателе гибкости системы имеют большие (до 44,4 %) значения, чем при неучете совместной работы.

4. Величины изгибающих моментов под серединой полосы при учете совместной работы полосы и грунта резко изменяются. Например, при использовании модели линейно-деформируемой полуплоскости в жесткой полосе ( $\alpha=0$ ) изгибающие моменты увеличиваются в 2,21 раза. При работе же полосы на винклеровском основании моменты увеличиваются незначительно (всего в 1,07 раза).

5. Значения изгибающих моментов (по модулю) в точке 1 (см. рис.) уменьшаются, и могут быть при некоторых значениях  $\alpha$  отличаться в несколько раз от таковых, рассчитанных без учета совместной работы полосы и грунта.

6. Величины реактивных давлений и изгибающих моментов в значительной степени зависят от применяемой модели грунтового основания. Таким образом, требуются четкие указания по применению той или иной модели

грунта в зависимости от вида грунта и его физико-механических характеристик.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Kissl, A. A. (2011). *Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations*. Proc. of the 3rd Intern. Symposium of Geotechnical Safety and Risk. Munich.

Pereira, C. & Caldeira, I. (2011). *Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic*. Proc. of the 3 rd. Intern. Symposium of Geotechnical Safety and Risk. Munich.

Stefanov, G. (2009). The Stochastic Finite Element Methods: Past, Present and Future. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 198, 9-12, 1031-1051.

Винников, Ю. М., Харченко, М. О., & Марченко, В. І. (2012). Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 26-32.

Горбунов-Посадов, М. И., Маликова, Т. А., & Соломин, В. И. (1984). *Расчет конструкций на упругом основании*. Москва: Стройиздат.

Горлов, А. М., & Серебряный, Р. В. (1968). *Автоматизированный расчет прямоугольных плит на упругом основании*. Москва: Стройиздат.

Жемочкин, Б. Н., & Синицын, А. П. (1962). *Практические методы расчета фундаментных балок и полос на упругом основании*. Москва: Госстройиздат.

Клепиков, С. Н. (1967). *Расчет конструкций на упругом основании*. Київ: Будівельник.

Кожушко, В. П. (1972). Розрахунок підземних споруд прямокутного перерізу з урахуванням обпирання перекриття на пружну опору. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 11, 110-114.

Кожушко, В. П. (1974). Розрахунок прямокутних підземних споруд як рам на двохшаровій основі. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, XV, 146-151.

Кожушко, В. П. (1990). *Расчет инженерных конструкций на линейно-деформируемом слое конечной толщины*. Киев: УМК ВО.

Крашенинникова, Г. В. (1964). *Расчет балок на упругом основании конечной глубины*. Москва – Ленинград: Энергия.

Лучковский, И. Я. (2000). *Взаимодействие конструкций с основанием*. Харків: ХДАТМ.

Мейз, Дж. (1974). *Теории и задачи механики сплошных сред*. Москва: Мир.

Овечкин, А. М. (1986). *Расчет балок на упругом основании. Метод сечения*. Москва: Высшая школа.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Оден, Дж. (1976). *Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред*. Москва: Мир.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., & Кулаженко, Є. Ю. (2014). Проблема визначення деформацій оправи перегінних тунелів при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 5, 62-69.
- Попов, Г. Я. (1982). *Контактные задачи для линейно-деформируемого основания*. Москва: Высшая

- школа.
- Симвулиди, И. А. (1987). *Расчет инженерных конструкций на упругом основании*. Москва: Высшая школа.
- Тютюкін, О. Л., & Мірошник, В. А. (2012). Розробка теоретичних основ модифікованого методу розрахунку тунелів колонного окреслення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2, 96-100.

В. П. КОЖУШКО<sup>1\*</sup>, С. М. КРАСНОВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости, конструкції та будівельна механіка», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. (057) 707 37 22, ел. пошта kmksm@ukr.net, ORCID 0000-0002-7044-776X

<sup>2</sup> Кафедра «Мости, конструкції та будівельна механіка», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. (097) 214 54 09, ел. пошта krasnov56@ukr.net, ORCID 0000-0002-2375-4273

## АНАЛІЗ РОБОТИ ЛОТКОВОГО ЕЛЕМЕНТА ПРЯМОКУТНОЇ ОПРАВИ ПІШОХІДНОГО ТУНЕЛЮ

**Мета.** Визначити розподіл реактивних тисків і згинальних моментів у лотковому елементі, що контактує з ґрунтовою основою, яка описується різними моделями ґрунту при різних показниках гнучкості системи «смуга – ґрунт». **Методика.** Розрахунок проведений за методикою, розробленою одним із авторів, який склав численні таблиці одиничних реактивних зусиль від різних поперечно прикладених зовнішніх навантажень і привантажень. **Результати.** Побудовано епюри реактивних тисків і згинальних моментів в лотковій смугі у залежності від прийнятої моделі ґрунту і показника гнучкості системи «смуга – ґрунт». При визначенні внутрішніх зусиль (згинальних моментів і поперечних сил) застосовано ступінчасту епюру за Жемочкіним і Синіциним (в межах кожної ділянки розбивки інтенсивність тиску постійна і дорівнює тиску під середньою ділянкою). Аналіз результатів розрахунку показав, що за формою епюри реактивного тиску значно відрізняються від форми епюри, отриманої без урахування спільної роботи лотка з ґрунтом. Згинальні моменти в середньому перетині смуги значно більші за величиною від моментів, отриманих при розрахунках без урахування спільної роботи її з ґрунтовою основою, а від’ємні моменти за модулем мають менші значення. Отримані при комбінованій моделі ґрунту результати дещо відрізняються від таких при розрахунку смуги на лінійно-деформованій півплощині. **Наукова новизна.** Отримана можливість прогнозування роботи лоткового елемента тунелю, при зміні його згинальної жорсткості і фізико-механічних характеристик ґрунту. **Практична значимість.** У результаті застосування даної методики розрахунку буде зекономлено певну кількість бетону і арматури.

**Ключові слова:** епюра реактивних тисків; епюра згинальних моментів; лінійно-деформівна півплощина; лінійно-деформівний шар скінченної товщини; вінклерівська основа; комбінована модель; показник гнучкості «смуга – ґрунт»

V. P. KOZHUSHKO<sup>1\*</sup>, S. N. KRASNOV<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Bridges, Constructions, Construction Mechanisms, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. (057) 707-37-22; e-mail kmksm@ukr.net, ORCID 0000-0002-7044-776X

<sup>2</sup> Department of Bridges, Constructions, Construction Mechanisms, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. (097) 214 54 09; e-mail krasnov56@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2375-4273

## ANALYSING OPERATION OF THE TROUGH ELEMENT OF A PEDESTRIAN TUNNEL RECTANGULAR LINING

**Purpose.** Distribution of reactive pressures and bending moments in the trough element which contacts with the soil base, described by various soil models with different indicators of the “lane-soil” system flexibility is investigated. **Methods.** The calculation was made according to the method developed by the author, who compiled extensive tables of individual reactive forces from different transversely applied external loads and surcharging. **Results.**

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

The curves of reactive pressures and bending moments in the trough lane are built depending on the adopted soil model and the indicator of the "lane-soil" system flexibility. When determining the internal forces (bending moments and transverse forces) a step diagram by Zhemochkin and Sinitsyn was used (within each section of the layout, the pressure intensity is constant and equal to the pressure at the middle of the section). Analysis of the calculation results showed that the shape of the diagram of the reactive pressure significantly differ from the shape of the diagram obtained without taking into account the joint work of the tray with the soil. The bending moments in the middle section of the strip are significantly larger in magnitude than the moments obtained in the calculations without taking into account its joint work with the soil base, and the absolutes of negative moments have lower values. The results obtained with the combined soil model are somewhat different from those calculated the strip on the linearly deformable half-plane. **Scientific novelty.** It was made possible to predict operation of the tunnel trough element when changing its flexural rigidity and physical and mechanical characteristics of the soil. **Practical value.** The considered method of calculation will help save a certain amount of concrete and reinforcement.

**Keywords:** reactive pressure curve; bending moment curve; linearly deformable half-plane; linearly deformable layer of finite thickness; Winkler base; combined model; "lane-soil" flexibility indicator

REFERENCES

- Kissl, A. A. (2011). *Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations*. Proc. of the 3rd Intern. Symposium of Geotechnical Safety and Risk. Munich. (in English)
- Pereira, C. & Caldeira, I. (2011). *Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic*. Proc. of the 3rd Intern. Symposium of Geotechnical Safety and Risk. Munich. (in English)
- Stefanov, G. (2009). The Stochastic Finite Element Methods: Past, Present and Future. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 198, 9-12, 1031-1051. (in English)
- Vynnykov, Yu. M., Kharchenko, M. O., & Marchenko, V. I. (2012). Rozrakhunok fundamentnoi plyty sylosiv na armovanii stokhastychinii osnovi. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 3, 26-32. (in Ukrainian)
- Gorbunov-Posadov, M. I., Malikova, T. A., & Solomin, V. I. (1984). *Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Gorlov, A. M., & Serebrjanyj, R. V. (1968). *Avtomatizirovannyj raschet prjamougol'nyh plit na uprugom osnovanii*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Zhemochkin, B. N., & Sinicyn, A. P. (1962). *Prakticheskie metody rascheta fundamentnyh balok i polos na uprugom osnovanii*. Moskva: Gosstrojizdat. (in Russian)
- Klepikov, S. N. (1967). *Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii*. Kyiv: Budivelnik. (in Russian)
- Kozhushko, V. P. (1972). Rozrakhunok pidzemnykh sporud priamokutnogo pererizu z urakhuvanniam obpyrannia perekryttia na pruzhnu oporu. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, 11, 110-114. (in Ukrainian)
- Kozhushko, V. P. (1974). Rozrakhunok priamokutnykh pidzemnykh sporud yak ram na dvosharovii osnovi. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, XV, 146-151. (in Ukrainian)
- Kozhushko, V. P. (1990). *Raschet inzhenernykh konstrukcij na linejno-deformiruemom sloe konechnoj tolshhiny*. Kiev: UMK VO. (in Russian)
- Krashennnikova, G. V. (1964). *Raschet balok na uprugom osnovanii konechnoj glubiny*. Moskva – Leningrad: Jenergija. (in Russian)
- Luchkovskij, I. Ja. (2000). *Vzaimodejstvie konstrukcij s osnovaniem*. Kharkiv: KhDATM. (in Russian)
- Mejz, Dzh. (1974). *Teorii i zadachi mehaniki sploshnyh sred*. Moskva: Mir. (in Russian)
- Ovechkin, A. M. (1986). *Raschet balok na uprugom osnovanii. Metod sechenija*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Oden, Dzh. (1976). *Konechnye jelementy v nelinejnoj mehanike sploshnyh sred*. Moskva: Mir. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Kulazhenko, Ye. Yu. (2014). Problema vyznachennia deformatsii opravy perehinnykh tuneliv pry suddievii zmini inzhenerno-heolohichnykh umov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 5, 62-69. (in Ukrainian)
- Popov, G. Ja. (1982). *Kontaktnye zadachi dlja linejno-deformiruemogo osnovanija*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Simvulidi, I. A. (1987). *Raschet inzhenernykh konstrukcij na uprugom osnovanii*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Tiutkin, O. L., & Miroshnyk, V. A. (2012). Rozrobka teoretychnykh osnov modyfikovanoho metodu rozrakhunku tuneliv kolonnoho okreslennia. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2, 96-100. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 06.05.2019  
Прийнята до друку 20.05.2019