

**ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ
ФАКТОРОВ НА ИЗГИБНЫЕ И ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В
КРУГОВОЙ ОБДЕЛКЕ ТОННЕЛЕЙ, А ТАКЖЕ СДВИЖЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ**

Карпюк И.А., Карпюк В.М., Варич А.С.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Введение. При строительстве подземного сооружения – тоннеля щитовым методом в грунтах средней прочности производится выемка грунта проходческим комбайном и устройство, вслед за этим, обделки тоннеля. Опыт показывает, что площадь поперечного сечения тоннеля с законченной обделкой всегда меньше площади произведенной выемки в грунте. И хотя строителями принимаются меры, чтобы заполнить этот зазор, нельзя избежать перераспределения напряжений и деформаций грунта в ходе строительства тоннеля. С целью избежания негативных последствий, повреждений существующих зданий и фундаментов на поверхности земли необходимо, с одной стороны, определять естественные, дополнительные и общие осадки отдельных ее точек, прогнозировать эти эффекты и определять внутренние усилия в обделке тоннелей, а, с другой стороны, принимать соответствующие эффективные меры. Такой анализ может быть выполнен численными методами, в частности с помощью программного комплекса PLAXIS-8 [1, 2, 3], т.к. точные методы носят пока достаточно условный характер и нуждаются в совершенствовании.

Результаты исследований. Численные исследования взаимодействия грунтов основания свайных фундаментов и плиты здания, а также тонкостенной круглоцилиндрической обделки тоннеля (ч. 1.) выполнены с применением математической теории планирования эксперимента [4], позволяющей теоретически обоснованно установить минимально необходимое количество и состав численных экспериментов для получения достаточно полной информации о качественном и количественном влиянии исследуемых факторов на выходные параметры как в отдельности, так и их взаимодействии, чего нельзя добиться при использовании традиционной методики.

На основании анализа имеющейся априорной информации из литературных источников и с учетом реальных напластований грунтов основания южного региона Украины в качестве исследуемых выбраны

факторы (табл. 1): номинальный (срединный) диаметр обделки тоннеля (X_1), уровень подземных вод (начало координат (рис. 1) от дневной поверхности грунта по оси Y , фактор X_2), приведенный тип грунтовых условий характерного для южного региона напластования (X_3 , рис.1), интегрально учитывающий влияние удельного веса грунта (γ_{unsat} или γ_{sat}), коэффициентов горизонтальной (k_x) и

вертикальной (k_y) фильтрации (проницаемости), модуля Юнга (деформаций, E_{ref}), коэффициента Пуассона (ν), сцепления (c_{ref}), угла внутреннего трения (φ) и дилатансии ψ грунта, а также коэффициента его упругого отпора (K) и определяемый по формуле:

$$T_{\text{red},j} = \sum_{i=1}^n (\gamma_{\text{sat},i} k_{x,i} k_{y,i} E_{\text{ref},i} \nu_i c_{\text{ref},i} \varphi_i \psi_i K_i) h_i / \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{sat},i}$ - удельный вес насыщенного водой i -того слоя грунта, изменяющийся в пределах 18,0...21,5кН/м³;

$k_{x,i}$ - коэффициент горизонтальной проницаемости (фильтрации) i - того слоя грунта, изменяющийся в пределах от 0,01 до 1,60м/сут.;

$k_{y,i}$ - коэффициент вертикальной проницаемости i -того слоя грунта, изменяющийся в пределах 0,01...1,60м/сут.;

$E_{\text{ref},i}$ - модуль Юнга (деформаций) i - слоя грунта, изменяющийся в пределах от 1000 до 5000кН/м²;

ν_i - коэффициент Пуассона i -того слоя грунта, изменяющийся в пределах 0,26...0,38;

$c_{\text{ref},i}$ - сцепление i -го слоя грунта, изменяющееся в пределах от 0,2 до 1400кН/м²;

φ_i - угол внутреннего трения i -того слоя грунта, изменяющийся в пределах 15...40°;

ψ_i - угол дилатансии i -того слоя грунта, изменяющийся в пределах от 0,01 (фактически, 0) до 0,30°;

K_i - коэффициент упругого отпора i -го слоя грунта, изменяющийся в пределах от 70 до 250 кН/м²;

$j=1, 2, 3$. $T_{\text{red},1}$; $T_{\text{red},2}$; $T_{\text{red},3}$ – приведенные типы грунтовых условий, соответственно, с минимальными, средними и максимальными (по литературным источникам) приведенными выше показателями грунтов, представленного на рис. 1 напластования.

Тоннели в рассматриваемом численном эксперименте имеют номинальные (срединные) диаметры 5,10 и 15м, а центры их расположены, соответственно, на глубинах 20,0; 22,5 и 25,0 м.

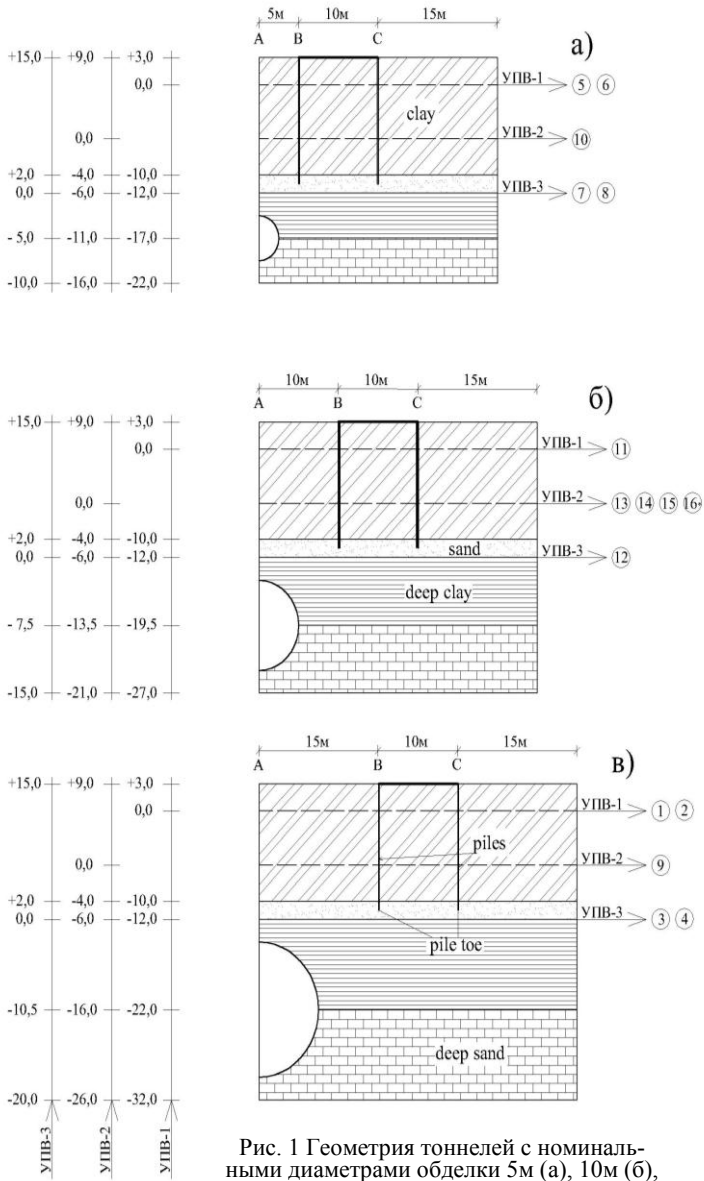


Рис. 1 Геометрия тоннелей с номинальными диаметрами обделки 5м (а), 10м (б), 15м (в), напластованиями грунтов и уровнями подземных вод для южного региона Украины

Таблица 1

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	«-1»	«0»	«+1»	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Диаметр обделки тоннеля, D , м	X_1	5	10	15	5м
Уровень подземных вод (начало координат от дневной поверхности грунта), $T_{op,i}$, м	X_2	+15 ($T_{op,1}$; УПВ-3)	+9 ($T_{op,2}$; УПВ-2)	+3 ($T_{op,3}$; УПВ-1)	6м
Приведенный тип грунтовых условий, $T_{red,j}$, [кН ⁴ град ² /(М ⁷ сут ²)]	X_3	226000 ($T_{red,1}$)	435000 ($T_{red,2}$)	644000 ($T_{red,3}$)	209000 кН ⁴ град ² /(М ⁷ сут ²)

Характерный для южного региона Украины разрез грунтового массива свидетельствует о наличии четырех различных слоев. Верхний слой мощностью 13м состоит из лессового суглинка. Под ним залегает слой мелкозернистого песка мощностью 2,0 м, который использован как несущий слой для свай старого здания – памятника архитектуры и градостроительства. Смещения этих свай могут вызвать повреждения здания – памятника, что является крайне нежелательным. Ниже песчаного слоя залегает глубинный слой красно-бурых суглинков и глин мощностью, соответственно, 5,0; 7,5 и 10,0 м. Это один из слоев, в котором сооружается тоннель. Другая часть тоннеля располагается в глубинном слое известняка – ракушечника понтического яруса с включениями перекристаллизованного известняка ракушечника в кровле. Этот нижний глубинный слой является достаточно жестким. Поэтому, только 5 м этого слоя включены в конечно-элементную модель. А нижняя часть основания тоннеля рассматривается как абсолютно жесткая и моделируется соответствующими граничными условиями.

Распределение порового давления воды принимается гидростатическим. Уровень подземных вод может располагаться на 3,9 и 15м ниже поверхности земли (на отметке условного нуля: $u=0$).

Поскольку обделка тоннеля и грунтовые напластования являются более-менее симметричными относительно вертикальной оси тоннеля, то в рассматриваемой модели плоской деформации учитываем только

одну (правую) половину обделки и грунтов основания. От центра тоннеля модель простирается на 30, 35 и 40 м в горизонтальном направлении. Параметр $T_{op,i}$ в расчетной модели принимается на отметках +3,0 м; +9,0 м и +15,0 м в General settings (общих параметрах настройки) а Bottom (дно) – на отм -10,0...-22,0 м; -15,0...-27,0 м; -20,0...-32,0 м в зависимости от заданных диаметров обделки тоннеля и уровня подземных вод.

Для создания расчетной схемы тоннеля используется программа проектировщика тоннеля, которая является специальным инструментом в программе *PLAXIS*, позволяющим применять круглые сегменты для моделирования геометрии тоннеля. Сваи под зданием являются несущими, для которых только небольшая часть несущей способности является результатом трения грунта по их боковой поверхности. Для корректного моделирования такого поведения сваи моделируются с использованием комбинации плит и междузловых анкеров. А само здание представляется как жесткая плита, опертая на междузловые анкера.

Граничные условия поставленной задачи создаются использованием кнопки *Standard fixities* (стандартные закрепления). В дополнение к стандартным закреплениям перемещений в верхней и нижней точках обделки вводятся фиксированные углы поворота ее элементов.

Свойства грунтов интегрально учитываются фактором X_3 . Для всех представленных слоев они считаются как дренированные, поскольку интерес представляют, прежде всего, деформации, происходящие в течение длительного периода времени как установившиеся. Для верхнего слоя используется опция увеличения его жесткости с глубиной. Наборы данных по двум нижним слоям включают соответствующие параметры для интерфейсов тоннеля. В других наборах данных свойства интерфейсов остаются при своих значениях по умолчанию. Следовательно, для верхнего слоя значение $E_{increment}$ (приращение) вводится в *Advanced* (дополнительно) в окне параметров. Значение E_{ref} (контрольное) становится контрольным значением на контрольном уровне $y_{reference}$. Фактическое значение E увеличивается с глубиной согласно:

$$E_{(y)} = E_{ref} + E_{increment} (y_{reference} - y) \cdot$$

В дополнение к четырем наборам данных для указанных на рис. 1 типов грунтов и их интерфейсов были созданы наборы данных для трех плит (обделки тоннеля, свайных пят и здания) в виде их нормальной EA и изгибной EI жесткостей, эквивалентной толщины d , веса w , коэффициента Пуассона железобетона ($\nu=0,15$). При этом, набор данных по зданию присваивается фундаментной плите, а удельный вес этой плиты в рассматриваемом программном комплексе представляет собой нагрузку от целого здания. Тип поведения материала плит рас-

смагивается как упругий. Данные по сваям присваиваются двум меж-узловым анкерам. Известно, что исследуемые факторы могут нелинейно влиять на изучаемые параметры, т.е. функцию выхода. Поэтому для построения нелинейных зависимостей между ними численные эксперименты выполняли по полному факторному, близкому по свойствам к Д - оптимальному, трехуровневому плану Бокса В₃ (табл. 2). К достоинству этого плана следует отнести то, что уравнения регрессии, полученные с его помощью, обеспечивают одинаковую точность прогнозирования выходного параметра в области, описываемой радиусом, равным 1 относительно нулевой точки.

Анализ математических моделей экспериментальных изгибающих моментов, поперечных и продольных сил в обделке сооружений с целью их минимизации. В соответствии с представленным в п.2 планом в программном комплексе *PLAXIS-8* был реализован численный эксперимент в 15-ти основных опытах (точках) и одном дополнительном, 16-ом, с увеличенной в 4 раза нагрузкой от расположенного на поверхности здания и с заменой в нем деревянных свай на железобетонные без изменения их шага. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

В процессе обработки полученных численным путем данных с использованием апробированного программного комплекса *COMPEX*, разработанного под руководством проф. Вознесенского В.А., после исключения незначимых и перерасчета оставшихся коэффициентов уравнений регрессии получены адекватные математические модели, обладающие достаточной информационной полезностью:

$$\hat{Y}_{(M_{max}^z)} = 604 + 419X_1 - 140X_2 + 88X_3 + 14X_3^2 - 113X_1X_2 + 73X_1X_3, \quad \frac{\text{кНм}}{\text{м.п.}}; \quad (2)$$

$$\hat{Y}_{(M_{min}^z)} = -(611 + 466X_1 - 126X_2 + 86X_3 + 31X_1^2 + 6X_2^2 - 106X_1X_2 + 73X_1X_3), \quad \frac{\text{кНм}}{\text{м.п.}}; \quad (3)$$

$$\hat{Y}_{(Q_{max}^z)} = 187 + 53X_1 - 38X_2 + 22X_3 - 17X_1^2 + 7X_3^2 - 18X_1X_2 + 11X_1X_3, \quad \text{кН/м.п.}; \quad (4)$$

$$\hat{Y}_{(Q_{min}^z)} = -(259 + 82X_1 - 49X_2 + 32X_3 - 21X_1^2 - 23X_1X_2 + 16X_1X_3), \quad \text{кН/м.п.}; \quad (5)$$

$$\hat{Y}_{(N_{max}^z)} = -(1888 + 1044X_1 + 132X_2 + 58X_3 + 39X_1^2 + 20X_2^2 - 12X_3^2 + 66X_1X_2), \quad \text{кН/м.п.} \quad (6)$$

Анализ представленных математических моделей (2...6) показывает, что наибольшее влияние на величину экстремальных внутренних усилий в обделке рассматриваемых тоннелей оказывает ее номинальный диаметр (фактор X_1), затем – уровень подземных вод (фактор X_2) и, наконец, приведенный тип грунтовых условий (фактор X_3). Существенно взаимодействуют между собой все рассматриваемые факторы. При этом, зависимость исследуемых параметров от рассматриваемых факторов носит неярко выраженный нелинейный характер.

Таблица 2

Трехуровневый план и основные результаты численного эксперимента при строительстве виртуального подземного транспортного сооружения

№ п/п	$X_1, Д, м$	$X_2, T_{оп.ис} М$	$X_3, T_{ред.л}, [кН^4 \text{град}^2 / (М^7 \text{сут}^2)]$	Внутренние усилия в обделке					Осадки (сдвигения) поверхности земли, мм								
				$N_{min},$ кН/М	$Q_{min},$ кН/М	$Q_{max},$ кН/М	$M_{min},$ кНМ м	$M_{max},$ кНМ м	т.А (x=0м)			т.В (x=Д)			т.С(x=Д+10м)		
									y_A	Δy_A	Σy_A	y_B	Δy_B	Σy_B	y_C	Δy_C	Σy_C
1	+	+	+	-3263	-298	204	-1028	925	23	70	93	60	47	107	59	28	87
2	+	+	-	-3083	-209	145	-728	623	25	98	123	79	64	143	78	38	116
3	+	-	+	-2879	-443	318	-1528	1461	19	68	87	72	41	113	72	24	96
4	+	-	-	-2697	-339	244	-1178	1105	18	96	114	97	56	153	97	33	130
5	-	+	+	-977	-149	113	-171	176	36	7	43	42	3	45	50	7	57
6	-	+	-	-924	-120	92	-139	141	45	9	54	58	10	68	57	4	61
7	-	-	+	-856	-198	150	-226	236	41	7	48	58	7	65	52	2	54
8	-	-	-	-802	-165	126	-190	197	52	10	62	79	10	89	71	3	74
9	+	0	0	-2968	-318	221	-1102	1015	18	80	98	77	49	126	78	29	107
10	-	0	0	-887	-157	119	-181	187	43	8	51	62	9	71	55	3	58
11	0	+	0	-2062	-194	139	-517	466	33	35	68	61	29	90	57	15	72
12	0	-	0	-1754	-313	230	-717	729	31	35	66	74	26	100	71	13	84

Продолжение таблицы 2

№ п/п	$X_1, Д, м$	$X_2, T_{op,i}, м$	$X_3, T_{red,i}, [кН^4 \text{град}^2 / (М^7 \text{сут}^2)]$	Внутренние усилия в обделке					Осадки (сдвигения) поверхности земли, мм								
				$N_{min},$ кН/м	$Q_{min},$ кН/м	$Q_{max},$ кН/м	$\frac{M_{min},}{м}$ кНМ	$\frac{M_{max},}{м}$ кНМ	т.А (x=0м)			т.В (x=Д)			т.С(x=Д+10м)		
									y_A	Δy_A	Σy_A	y_B	Δy_B	Σy_B	y_C	Δy_C	Σy_C
13	0	0	+	-1934	-298	216	-683	691	30	30	60	61	24	85	51	11	62
14	0	0	-	-1819	-235	172	-542	542	35	43	78	81	33	114	79	17	96
15	0	0	0	-1877	-266	193	-611	615	32	35	67	68	27	95	56	13	69
16	0	0	0*	-1894	-297	214	-680	687	137	36	173	423	25	448	234	13	247

Примечание*: Удельный вес плиты, имитирующий нагрузку от расположенного на поверхности здания, в опыте №16 увеличен с $w=25$ кН/м/м до 100 кН/м/м, а также деревянные сваи (анкеры) с нормальной жесткостью $EA=3,2 \cdot 10^6$ кН заменены на железобетонные с $EA=1,1 \cdot 10^7$ кН при неизменном шаге $L_{spacing}=1$ м.

Так, максимальный положительный изгибающий момент в нижнем (лотковом) вертикальном сечении обделки тоннеля M^+_{max} увеличивается по отношению к своему среднему значению 604 кНм/м, а минимальный отрицательный изгибающий момент в горизонтальном (меридиальном) сечении M^-_{min} уменьшается по сравнению со своим средним значением -611 кНм/м для тоннеля диаметром $D=10$ м при уровне подземных вод $T_{op,2}=9$ м от дневной поверхности грунта со средним приведенным типом грунтовых условий $T_{red,2}=435000$ кН⁴град²/(М⁷сут²) с увеличением диаметра тоннеля D от 5 до 15 м, соответственно, на 139 % и 152 %, понижением уровня грунтовых вод T_{op} от 3 до 15 м от дневной поверхности – на 46 % и 41 %, увеличением приведенной характеристики (типа) грунтовых условий T_{red} от 226000 до 644000 кН⁴град²/(М⁷сут²) – на 29 % и 28 %. M^+_{max} возрастает, а M^-_{min} , соответственно, уменьшается при одновременном увеличении диаметра тоннеля и уменьшения уровня подземных вод, одновременном увеличении диаметра тоннеля и величины приведенного типа грунтовых условий. Наличие положительных квадратических эффектов в математических моделях (2) и (3) при факторах X_1^2 , X_2^2 и X_3^2 свидетельствует о том, что при дальнейшем увеличении диаметра тоннеля за пределами рассматриваемого варьирования абсолютное значение отрицательного изгибающего момента в горизонтальном сечении будет увеличиваться нелинейно, а при дальнейшем понижении уровня подземных вод это понижение будет носить затухающий характер, что физически объясняется уменьшением взвешивающего действия воды.

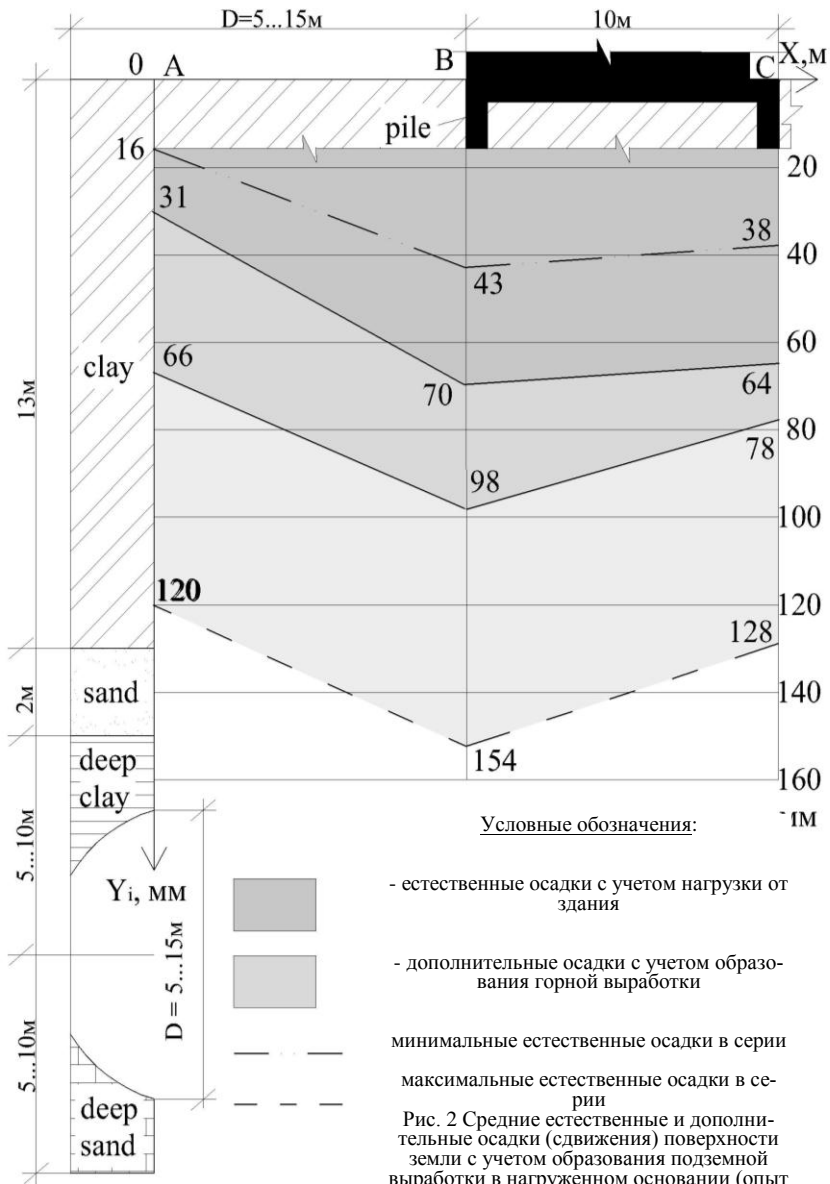
При дальнейшем увеличении характеристик приведенного типа грунтовых условий за пределами варьирования максимальный изгибающий момент в лотковом вертикальном сечении нелинейно будет возрастать, что физически можно объяснить увеличением вертикальной составляющей нагрузки с увеличением плотности грунта.

Геометрическая интерпретация влияния исследуемых факторов на экстремальные значения изгибающих моментов в обделке тоннеля представлена на рис. 2,а. Минимальное (отрицательное) значение поперечной (перерезывающей) силы в обделке тоннеля наблюдается в горизонтальном, близком к меридиальному, сечении, а максимальная поперечная сила – в вертикальном лотковом сечении. Так, абсолютная величина их увеличивается (см (4), (5)) по отношению к средним значениям при увеличении диаметра тоннеля от 5 до 15 м, соответственно, на 63 и 57 %, понижении уровня подземных вод от 3 до 15 м от дневной поверхности – на 38 и 41 %, увеличении значений типа грунтовых условий T_{red} от 226000 до 644000 кН⁴град²/(М⁷сут²) – на 25 и 24 %, а также при одновременном увеличении диаметра тоннеля и пониже-

нии уровня подземных вод, одновременном увеличении диаметра тоннеля и значений типа грунтовых условий, т.е., главным образом, плотности грунта. Отрицательные знаки при квадратичных эффектах X^2_1 в обеих моделях показывают, что при дальнейшем увеличении диаметра тоннеля за пределами варьирования нарастание абсолютных значений поперечной силы будет носить затухающий характер, а положительный знак при квадратичном эффекте X^2_3 в модели (4), - что при дальнейшем увеличении типа грунтовых условий, наоборот, - слабовыраженную тенденцию нарастания положительных значений поперечной силы в лотковом сечении. Влияние исследуемых факторов на этот выходной параметр графически представлено на рис. 2, б.

В отличие от предыдущих экстремальных внутренних усилий в обделке тоннеля, отрицательный знак в модели (6) показывает, что по всему контуру тоннеля кольцевого сечения обделка испытывает сжимающие напряжения. Наибольшая продольная сжимающая сила наблюдается в горизонтальном, близком к меридиальному, сечении. Она может быть охарактеризована математической моделью (6), анализ которой показывает, что с увеличением всех исследуемых факторов это внутреннее усилие также будет увеличиваться (рис. 2, в) по абсолютной величине. При этом, продольная сжимающая сила увеличивается по отношению к среднему своему значению 1888кН/м с увеличением диаметра тоннеля от 5 до 15 м на 111%, повышением уровня подземных вод от 15 до 3 м от дневной поверхности – на 14 %, увеличении значений типа грунтовых условий от 226000 до 644000 кН⁴град²/(М⁷сут²) – на 6 %, а также при одновременном увеличении диаметра тоннеля и повышении уровня подземных вод. При дальнейшем увеличении значений первых двух факторов за пределами их варьирования абсолютная величина продольной сжимающей силы нелинейно будет нарастать, а третьего фактора (T_{red}), наоборот, - убывать. Таким образом, проведенный анализ математических моделей (2)...(6) показал, что увеличение диаметра тоннеля и значений типа грунтовых условий приводит к, нелинейному, как правило, увеличению всех внутренних усилий в его обделке в то время, как понижение уровня подземных вод – только изгибных внутренних усилий, т.е. экстремальных изгибающих моментов и поперечных сил.

Приведенные математические модели (2)...(6) удобно использовать не только для оценки влияния того или иного фактора как по отдельности, так и во взаимодействии друг с другом, а также для решения оптимизационных задач, в которых используются пусть и стохастические, но все - же математически обоснованные зависимости рассматриваемых выходных параметров от исследуемых факторов.



Увеличение равномерно распределенной нагрузки от расположенного справа от будущей выработки здания в четыре раза (от $w=25 \frac{\text{кНм}}{\text{м}}$ до $100 \frac{\text{кНм}}{\text{м}}$, опыт №*16) приведет к увеличению внутренних усилий в обделке всего до 12% при средних значениях исследуемых факторов.

Осадки поверхности земли. Реализация численного эксперимента позволила с помощью ПК «PLAXIS-8» определить естественные и дополнительные осадки характерных точек поверхности земли (рис. 3): т. А, расположенной над продольной осью выработки; т. В, находящейся у ближнего угла здания на расстоянии D от продольной оси выработки и т. С, расположенной у дальнего угла здания на расстоянии D+10м от той же оси, с учетом собственного веса грунтов основания, нагрузки от здания и образования в них подземной выработки. Эти осадки удобно было разделить на естественные осадки поверхности земли с учетом нагрузки от рядом расположенного здания и собственно веса грунтов основания, которые могут быть выражены с помощью адекватных, обладающих достаточной информационной полезностью математических моделей (7)...(9), и общих осадок тех же точек поверхности земли с учетом действия кроме названных факторов еще и образования горной выработки на некотором удалении и углублении от здания (рис. 3), которые удобно представить математическими моделями (10)...(12).

Математические модели, характеризующие естественные осадки поверхности земли с учетом нагрузки от здания:

$$\hat{Y}(Y_A, X = 0_m) = 31 - 11X_1 - 3X_3 + 3X_1X_2 + 2X_1X_3, \text{ мм, } v=5,2\%; \quad (7)$$

$$\hat{Y}(Y_B, X = D) = 70 + 9X_1 - 8X_2 - 10X_3, \text{ мм, } v=5,5\%; \quad (8)$$

$$\hat{Y}(Y_C, X = D + 10_m) = 64 + 10X_1 - 6X_2 - 10X_3, \text{ мм, } v=7,5\%. \quad (9)$$

Модели, описывающие естественные и дополнительные осадки поверхности земли с учетом загрузки от здания и образования подземной выработки в грунтах основания:

$$\hat{Y}(\Sigma Y_A, X = 0_m) = 66 + 26X_1 - 10X_3 + 8X_1^2 + 3X_3^2 + 4X_1X_2 - 3X_1X_3, \text{ мм, } v = 5\%; \quad (10)$$

$$\hat{Y}(\Sigma Y_B, X = D) = 98 + 30X_1 - 7X_2 - 15X_3 - 4X_1X_2, \text{ мм, } v = 5,4\%; \quad (11)$$

$$\hat{Y}(\Sigma Y_C, X = D + 10_m) = 78 + 23X_1 - 5X_2 - 12X_3 + 5X_1^2 - 3X_1X_3, \text{ мм, } v = 5,6\%. \quad (12)$$

Определенный практический интерес могут вызвать у специалистов дополнительные осадки (сдвигения) тех же точек земли, обусловлен-

ные только образованием упомянутой горной выработки и их отношение к общим осадкам, которые можно также выразить через соответствующие математические модели (13)...(15) и (16)...(18).

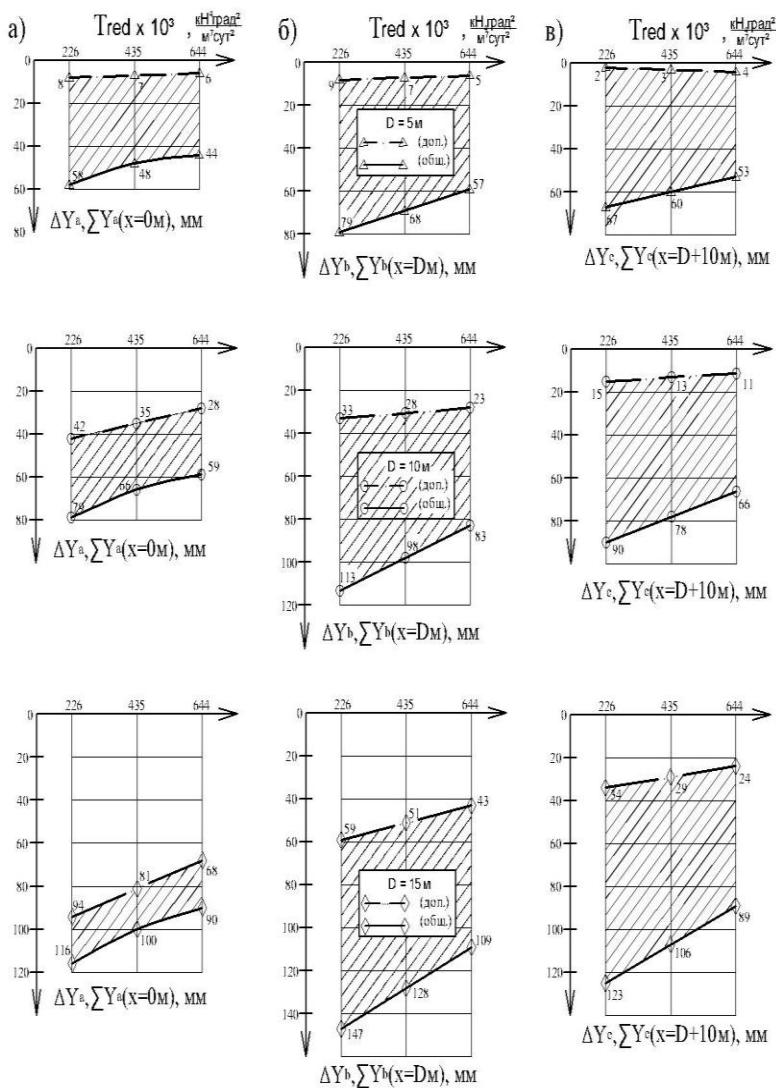


Рис. 3 Зависимость дополнительных и общих осадков поверхности земли (сдвижений) в сечениях над горной выработкой (а), у ближнего угла здания (б), у дальнего угла здания (в) от типа грунтовых условий T_{red} и номинального диаметра обделки горной выработки D

Математические модели, характеризующие дополнительные осадки (сдвигения) поверхности земли, обусловленные образованием горной выработки в грунтах основания:

$$\hat{Y}(\Delta Y_A, X = 0_m) = 35 + 37X_1 - 7X_3 + 9X_1^2 - 6X_1X_3, \text{ мм, } v=5,7\%; \quad (13)$$

$$\hat{Y}(\Delta Y_B, X = D) = 28 + 22X_1 - 5X_3 + 1X_1^2 + 2X_1X_2 - 3X_1X_3, \text{ мм, } v = 6,5\%; \quad (14)$$

$$\hat{Y}(\Delta Y_C, X = D + 10_m) = 13 + 13X_1 + 2X_2 - 2X_3 + 3X_1^2 - 3X_1X_3, \text{ мм, } v = 11,4\%; \quad (15)$$

$$\hat{Y}(\Delta Y_B / \Sigma Y_B, X = D) = 0,29 + 0,14X_1 + 0,02X_2 - 0,01X_3 + 0,03X_1^2 + 0,02X_1X_2, v = 5,2\%; \quad (16)$$

$$\hat{Y}(\Delta Y_C / \Sigma Y_C, X = C) = 0,17 + 0,11X_1 + 0,03X_2 - 0,01X_1^2, v = 9,9\%. \quad (17)$$

Модели, описывающие отношения дополнительных осадок поверхности земли, вызванных образованием горной выработки в нагруженных грунтах основания, к общим осадкам:

$$\hat{Y}(\Delta Y_A / \Sigma Y_A, X = 0_m) = 0,53 + 0,32X_1 - 0,03X_1^2, v=5,7\%. \quad (18)$$

Анализ представленных моделей показывает, что естественные осадки поверхности земли с учетом нагрузок от здания достигают наибольших значений именно в точках В и С (рис. 3), в одинаковой степени линейно зависят от исследуемых факторов и, в среднем, более чем в два раза превышают аналогичные осадки в т. А, расположенной на удалении 5...15м (в среднем 10м), т.е. равном, в среднем, ширине здания. Так, естественные осадки поверхности земли по оси будущей выработки (т. А) и под зданием (т. В и т. С) с учетом нагрузки от него увеличатся (рис. 4) по отношению к их средним значениям 31 и 67мм, соответственно, с ухудшением типа грунтовых условий с $T_{\text{ред}}$ от $644 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2}$ до $226 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2}$ на 19 и 30%, повышением

уровня подземных вод от 15 до 3м от поверхности земли – на 21%, увеличением мощности вовлекаемых в зону деформаций грунтов, в пределах которых предполагается обустройство выработки, - на 28%.

Максимальные дополнительные осадки (сдвигения) поверхности земли (рис. 3), обусловленные образованием горной выработки в грунтах основания, наблюдаются на уровне продольной оси этой выработки (т. А) и постепенно уменьшаются по мере удаления от нее на расстояние D (т. В), в среднем, на 20%, а на расстояние D+10м (т. С) - на 63%.

Наибольшее влияние на дополнительные осадки поверхности земли оказывает диаметр выработки. С его увеличением от 5 до 15м дополнительные осадки т. А увеличиваются на 211%, т. В на 157% , а т. С – на 200% по отношению к своим средним значениям 35,28 и 13мм. Наличие квадратичных эффектов при этом факторе в математических моделях (13), (14), (15) свидетельствует о том, что при дальнейшем увеличении диаметра выработки за указанными пределами дополнительные осадки поверхности земли в рассматриваемых точках будут нарастать нелинейно.

Следующим по степени влияния на дополнительные осадки поверхности земли является тип грунтовых условий. С его ухудшением от T_{red} от $644 \cdot 10^3 \text{кН}^4 \cdot \text{град}^2 / (\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2)$ до $226 \cdot 10^3 \text{кН}^4 \cdot \text{град}^2 / (\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2)$ в т. А, В, С они увеличиваются, соответственно, на 40%, 36% и 31%.

Существенно взаимодействуют между собой оба указанных фактора. Так, при одновременном увеличении диаметра выработки и ухудшении типа грунтовых условий дополнительные осадки поверхности земли увеличиваются до 20%.

Общие осадки поверхности земли, состоящие из естественных осадков с учетом нагрузки от здания и дополнительных осадков, обусловленных обустройством выработок, возрастают по отношению к своим средним значениям 66мм (т. А), 98 мм (т. В) и 78мм (т. С): с увеличением диаметра выработки от 5 до 15м, соответственно, на 79%, 61% и 59%; ухудшением типа грунтовых условий от T_{red} от $T_{red} = 644 \cdot 10^3 \text{кН}^4 \cdot \text{град}^2 / (\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2)$ до $226 \cdot 10^3 \text{кН}^4 \cdot \text{град}^2 / (\text{м}^7 \cdot \text{сут}^2)$ - на 30%, 31% и 32%; понижением уровня подземных вод от $T_{op,3}=3\text{м}$ до $T_{op,1}=15\text{м}$ в т. В и С, соответственно, на 14% и 13%; одновременным увеличением диаметра выработки и ухудшением типа грунтовых условий.

Положительный знак при квадратичном эффекте X_1 , показывает, что при дальнейшем увеличении диаметра за пределами варьирования общие осадки нелинейно будут возрастать.

Увеличение равномерно распределенной нагрузки от расположенного справа от будущей выработки здания в четыре раза (от $W=25\text{кН/м}$ до 100кН/м) приведет к увеличению естественных осадков поверхности земли в т. А, В и С соответственно, до 137мм, 423мм и 234мм, т.е. в 4,4; 6,0 и 3,7 раз при «нулевых» (средних) значениях исследуемых факторов.

Выводы

Приведенные математические модели (2)...(15) удобно использовать не только для оценки влияния того или иного фактора как по от-

дельности, так и во взаимодействии друг с другом на величину внутренних усилий в обделках тоннелей, осадки поверхности земли, а также для решения оптимизационных задач, в которых используются пусть и стохастические, но всё - же математически обоснованные зависимости рассматриваемых выходных параметров от исследуемых факторов.

Увеличение равномерно распределенной нагрузки от расположенного справа от будущей выработки здания в четыре раза (от $w=25$ кНм/м до 100 кНм/м, опыт №16) приведет к увеличению суммарных осадок поверхности земли, обусловленных строительством тоннеля, - в 4...6 раз, что

может спровоцировать повреждения самого здания, прилегающего дорожного полотна и рельсовых путей.

Предложенная методика позволяет достаточно быстро определить внутренние усилия в обделке тоннеля и осадки поверхности земли без выполнения громоздких расчетов в грунтовых условиях южного региона Украины, а также спрогнозировать возможные последствия в процессе его прокладки.

Summary

In the article results over of numeral experiment on the study of influence of sizes of underground building, level of underwaters, type of the ground terms, sizes of the up-diffused loading are brought from pile - the tiled grillage of building on the size of sinking (moving) of terrene above the underground making, for a fellow creature and distant from her corners of the alongside located building, and also statistical mathematical models characterizing the indicated fallouts in the large turn-down of the investigated factors.

Литература

1. [PLAXIS - инструмент инженера-геотехника. Примеры расчетов // CADmaster. - 2002. - № 3. - С. 62-65.](#)
2. Щекудов Е.В. Реализация современных расчетных методов при совершенствовании конструктивно- технологических решений подземных сооружений транспортного назначения / Е.В. Щекудов // Технологии мира/ - 2011. - 10с.
3. Голубев А.И. Программный комплекс PLAXIS – эффективный инструмент для геотехнических расчетов транспортных сооружений/ А.И. Голубев, А.В. Селецкий //Дороги. Инновации в строительстве. - 2011. - № 9, с. 58-60.
- 4 Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ В. А. Вознесенский [2-е изд. испр. и доп.]. – М.:Финансы и статистика, 1981. – 215с.