

**УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЧИННИКІВ І ЧИННИКІВ  
ЗОВНІШНЬОЇ ДІЇ НА ВНУТРІШНІ ЗУСИЛЛЯ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПРАВАХ  
ТУНЕЛІВ**

В. М. Карпюк, А. І. Менейлюк, І. А. Карпюк, О. В. Сурду

*У статті приведені результати чисельного експерименту по вивченню впливу розмірів підземної споруди, рівня підземних вод, типу ґрунтових умов, величини розподіленого навантаження від пале-плитного ростверку будівлі на величину екстремальних згинальних моментів, поперечних і подовжніх сил в залізобетонній оправі тунелів кільцевого перерізу, а також статистичні математичні моделі, що характеризують вказані внутрішні зусилля у великому діапазоні зміни дослідних чинників.*

**Ключові слова:** тунель, оправа, чинники, модель, згинальний момент, поперечна і подовжня сила.

**ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ И ФАКТОРОВ  
ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
ОБДЕЛКАХ ТОННЕЛЕЙ**

В. М. Карпюк, А. И. Менейлюк, И. А. Карпюк, А. В. Сурду

*В статье приведены результаты численного эксперимента по изучению влияния размеров подземного сооружения, уровня подземных вод, типа грунтовых условий, величины распределенной нагрузки от свайно-плитного ростверка здания на величину экстремальных изгибающих моментов, поперечных и продольных сил в железобетонной обделке тоннелей кольцевого сечения, а также статистические математические модели, характеризующие указанные внутренние усилия в большом диапазоне изменения исследуемых факторов.*

**Ключевые слова:** тоннель, обделка, факторы, модель, изгибающий момент, поперечная и продольная сила.

**DETERMINATION OF INTERNAL POWER FACTORS IN THE REINFORCE-CONCRETE  
SHIRT OF TUNNELS BY MEANS OF NUMERAL AND STATISTICAL METHODS**

V. Karpiuk, A. Meneilyuk, I. Karpiuk, A. Surdu

*In the article results over of numeral experiment on the study of influence of sizes of underground building, level of underwaters, type of soil conditions, sizes of the up-diffused loading are brought from pile the tiled grillage of building on the size of extreme flexion moments, transversal and longitudinal forces in the reinforce-concrete shirt of tunnels of circular section, and also static mathematical models characterizing the indicated internal efforts in the large turn-down of the investigated factors.*

**Keywords:** tunnel, factors, model, flexion moment, transversal and longitudinal force.

**Введение.** При строительстве подземного сооружения – тоннеля щитовым методом в грунтах средней прочности производится выемка грунта проходческим комбайном и устройства, 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, 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 (рис. 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 напластований ( $X_3$ , рис.1), интегрально учитывающий влияние удельного веса грунта ( $\gamma_{\text{unsat}}$  или  $\gamma_{\text{sat}}$ ), коэффициентов горизонтальной ( $k_x$ ) и вертикальной ( $k_y$ ) фильтрации (проницаемости), модуля Юнга (деформаций,  $E_{\text{ref}}$ ), коэффициента Пуассона ( $\nu$ ), сцепления ( $c_{\text{ref}}$ ), угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) и дилатансии  $\psi$  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/м<sup>3</sup>;

$k_{x,i}$  – 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/м<sup>2</sup>;

$\nu_i$  – 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/м<sup>2</sup>;

$\varphi_i$  – угол внутреннего трения  $i$ -того слоя грунта, изменяющийся в пределах 15...40°;

$\psi_i$  – 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/м<sup>2</sup>;

$j=1, 2, 3$ .  $T_{\text{red},1}$ ;  $T_{\text{red},2}$ ;  $T_{\text{red},3}$  – 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 15 м, а центры их расположены, соответственно, на глубинах 20,0; 22,5 и 25,0 м.

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 15 м ниже поверхности земли (на отметке условного нуля:  $y=0$ ).

Таблиця 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, $T_{red,i}$ , [кН <sup>4</sup> град <sup>2</sup> /(М <sup>7</sup> сут <sup>2</sup> )]	$X_3$	226000 ( $T_{red,1}$ )	435000 ( $T_{red,2}$ )	644000 ( $T_{red,3}$ )	209000 кН <sup>4</sup> град <sup>2</sup> /(М <sup>7</sup> сут <sup>2</sup> )

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 уровней 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 межзубовых анкеров. А само здание представляется как жесткая плита, опертая на межзубовые 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:  $E_{(y)} = E_{ref} + E_{increment} (y_{reference} - y)$ .

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 рассматривается как упругий.

Данные по сваям присваиваются двум межзубовым 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  $D$  - оптимальному, трехуровневому плану Бокса  $B_3$  (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.

Таблица 2 – Трехуровневый план и основные результаты численного эксперимента при строительстве виртуального подземного транспортного сооружения

№ п/п	X <sub>1</sub> , D, м	X <sub>2</sub> , T <sub>оп.т.</sub> , м	X <sub>3</sub> , T <sub>ред.т.</sub> , [кН <sup>4</sup> град <sup>2</sup> /(М <sup>4</sup> сут <sup>2</sup> )]	Внутренние усилия в обделке					Сдвигения поверхности земли								
				N <sub>min</sub> , кН/м	Q <sub>min</sub> , кН/м	Q <sub>max</sub> , кН/м	M <sub>min</sub> , кНм	M <sub>max</sub> , кНм	т.А (x=0м)			т.В (x=D)			т.С(x=D+10м)		
									y <sub>A</sub>	Δy <sub>A</sub>	Σy <sub>A</sub>	y <sub>B</sub>	Δy <sub>B</sub>	Σy <sub>B</sub>	y <sub>C</sub>	Δy <sub>C</sub>	Σy <sub>C</sub>
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
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, имитирующей 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=3,2·10<sup>6</sup> кН заменены на железобетонные с EA=1,1·10<sup>7</sup> кН при неизменном шаге L<sub>spacing</sub>=1 м.

**Анализ математических моделей экспериментальных изгибающих моментов, поперечных и продольных сил в обделке сооружений с целью их минимизации.** В соответствии с представленным в п.2 плане 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:

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

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

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

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

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

Анализ представленных математических моделей (2...3) показывает, что наибольшее влияние на величину экстремальных внутренних усилий в обделке рассматриваемых тоннелей оказывает ее номинальный диаметр (фактор X<sub>1</sub>), затем – уровень подземных вод (фактор X<sub>2</sub>) 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.

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  $T_{red,2}=435000$  кН<sup>4</sup>град<sup>2</sup>/(мсут<sup>2</sup>) 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 кН<sup>4</sup>град<sup>2</sup>/(М<sup>7</sup>сут<sup>2</sup>) – 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 квадратичных 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.

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 кН<sup>4</sup>град<sup>2</sup>/(М<sup>7</sup>сут<sup>2</sup>) – на 25 и 24 %, а также при одновременном увеличении диаметра тоннеля и понижении уровня подземных вод, одновременном увеличении диаметра тоннеля и значений типа грунтовых условий, т.е., главным образом, плотности грунта.

Отрицательные знаки при квадратичных эффектах  $X_1^2$  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  $X_3^2$  в модели (4), – что при дальнейшем увеличении типа грунтовых условий, наоборот, – слабовыраженную тенденцию нарастания положительных значений поперечной силы в лотковом сечении.

Влияние каждого исследуемого фактора как в отдельности, так и во взаимодействии графически представлено на рис. 3.

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. 4) 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 кН<sup>4</sup>град<sup>2</sup>/(М<sup>7</sup>сут<sup>2</sup>) – на 6 %, а также при одновременном увеличении диаметра тоннеля и повышении уровня подземных вод.

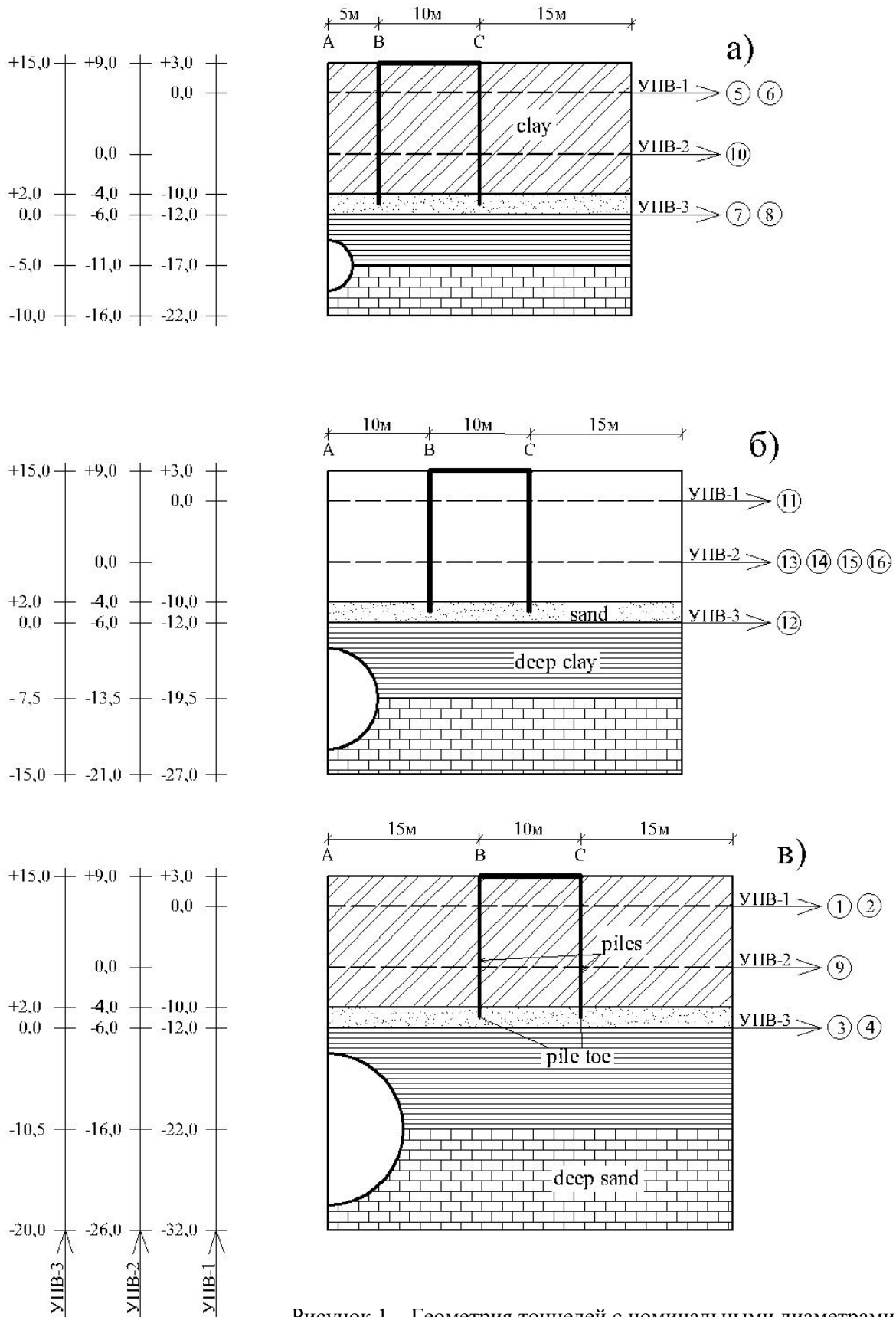
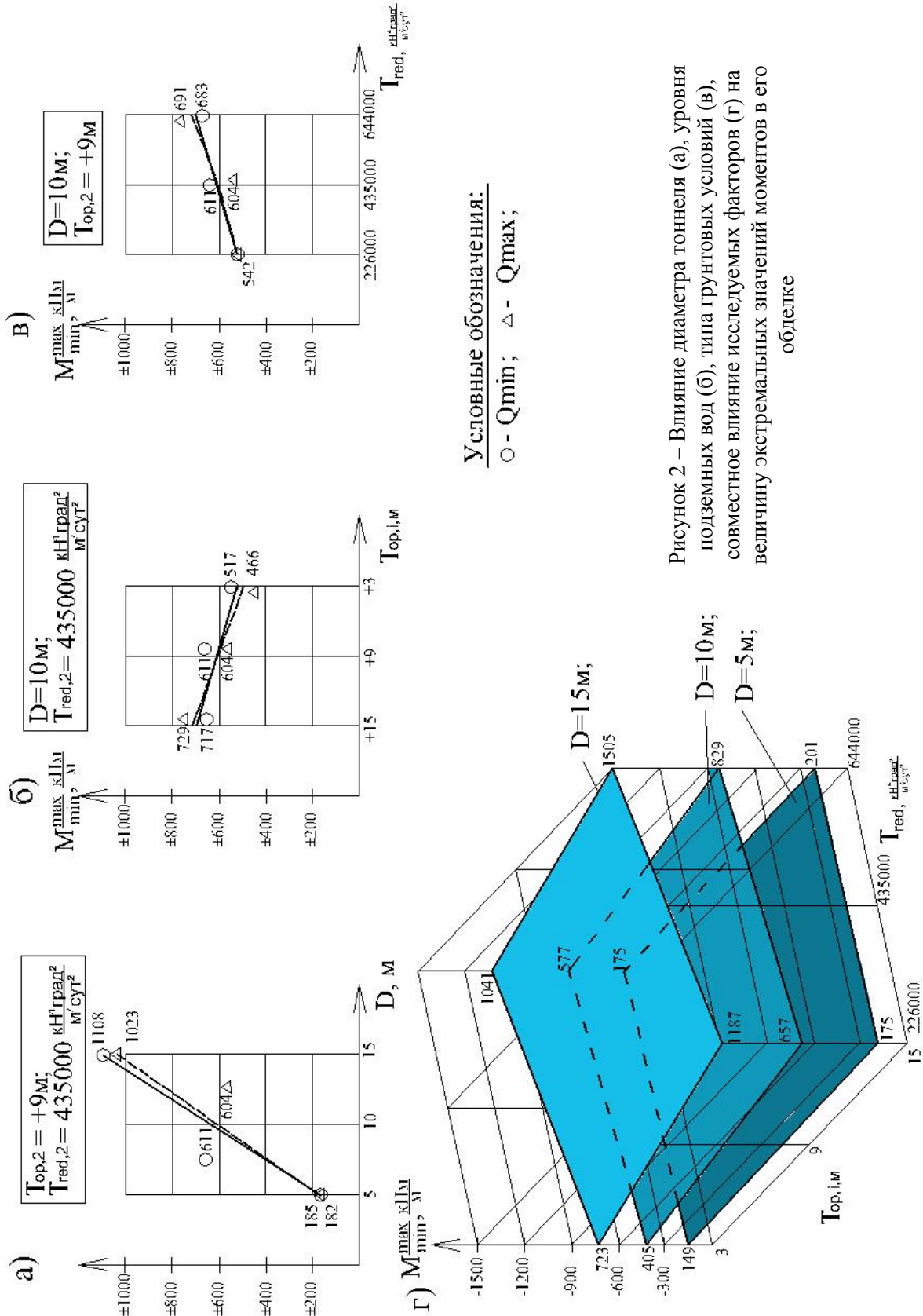


Рисунок 1 – Геометрия тоннелей с номинальными диаметрами обделки 5 м (а), 10 м (б), 15 м (в), напластованиями грунтов и уровнями подземных вод для Южного региона Украины

Условные обозначения:

(i) - номер опыта



Условные обозначения:  
 ○ -  $Q_{\text{min}}$ ; △ -  $Q_{\text{max}}$ ;

Рисунок 2 – Влияние диаметра тоннеля (а), уровня подземных вод (б), типа грунтовых условий (в), совместное влияние исследуемых факторов (г) на величину экстремальных значений моментов в его обделке

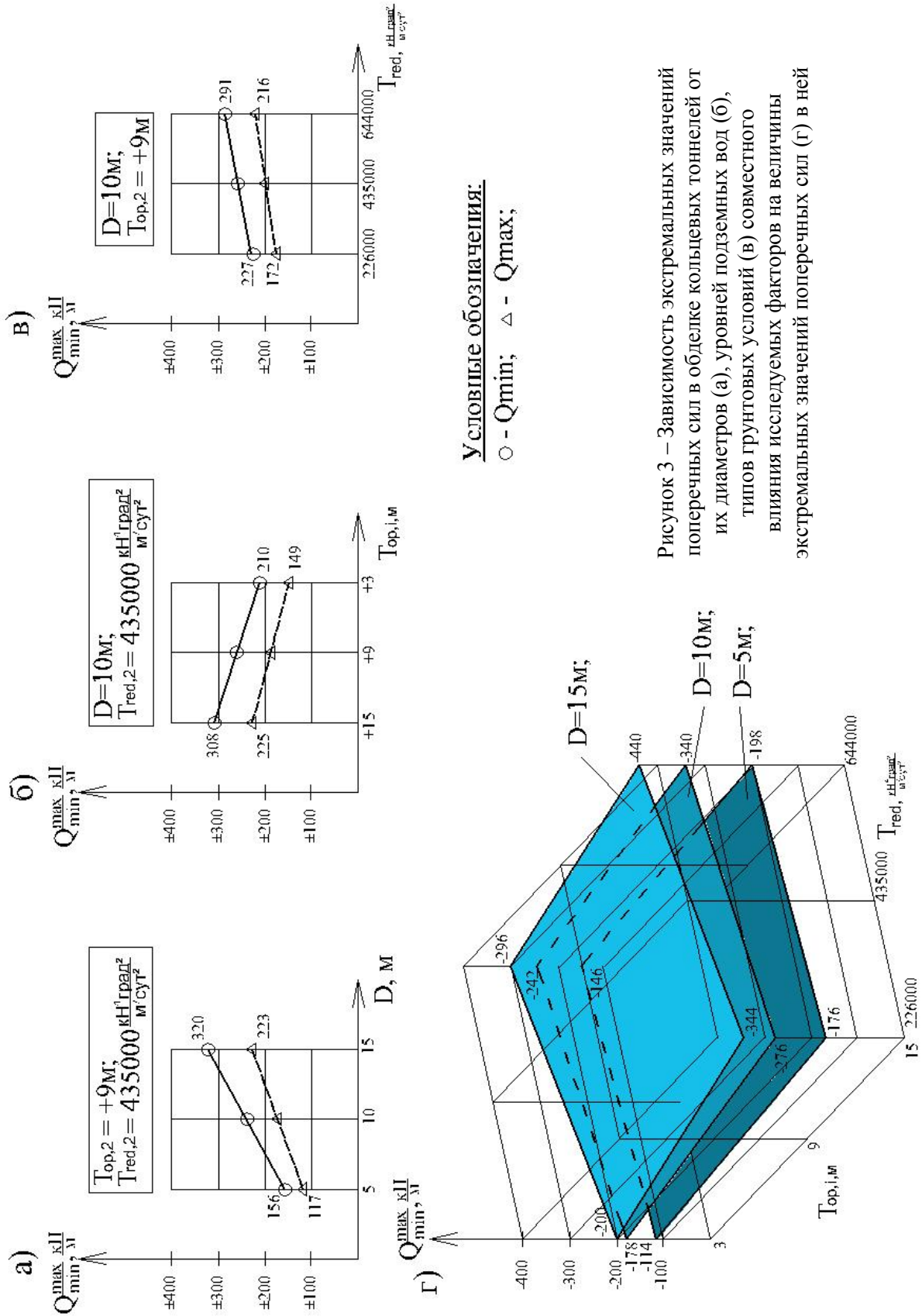


Рисунок 3 – Зависимость экстремальных значений поперечных сил в обделке кольцевых тоннелей от их диаметров (а), уровня подземных вод (б), типов грунтовых условий (в) совместного влияния исследуемых факторов на величины экстремальных значений поперечных сил (г) в ней



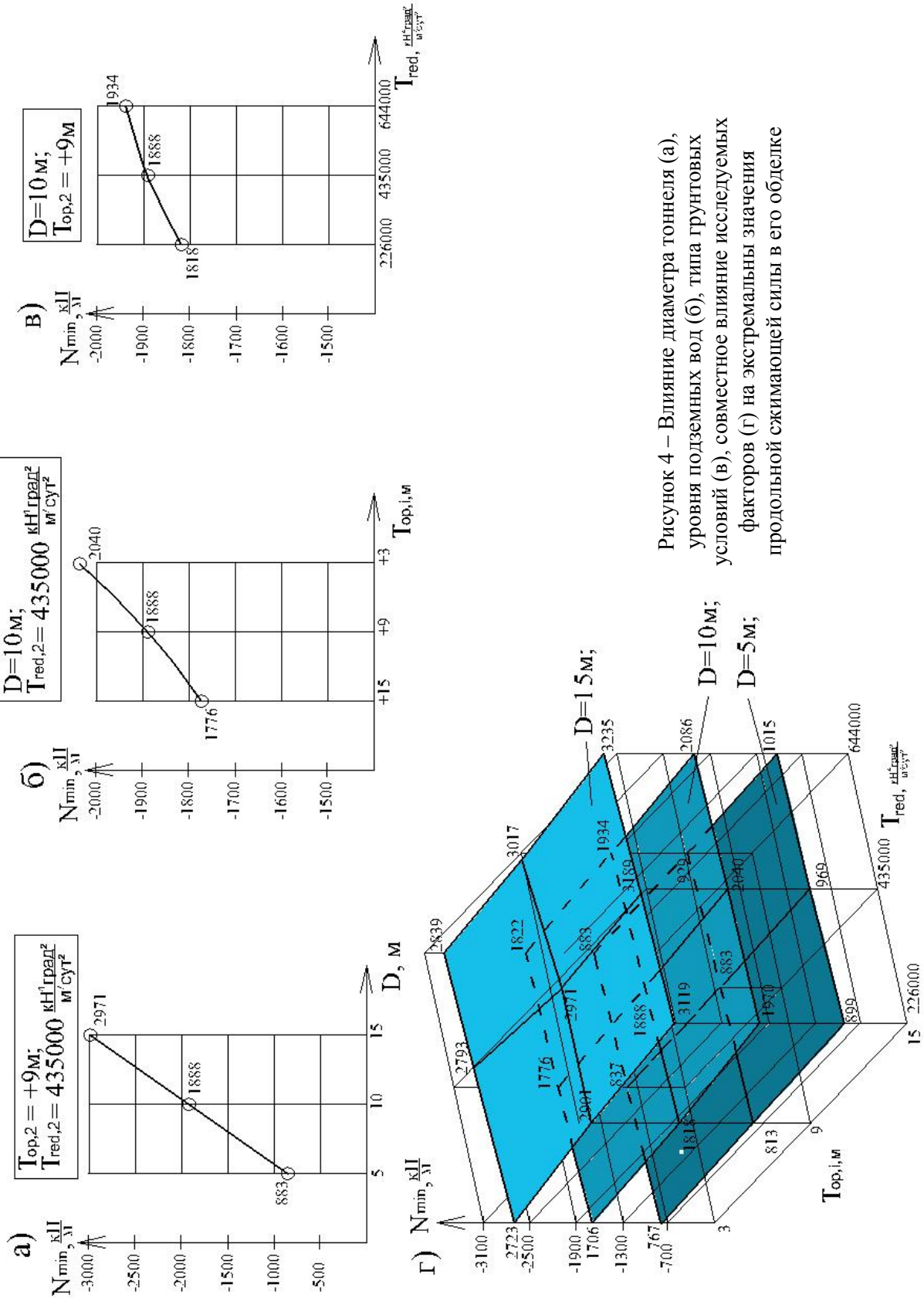


Рисунок 4 – Влияние диаметра тоннеля (а), уровня подземных вод (б), типа грунтовых условий (в), совместное влияние исследуемых факторов (г) на экстремальные значения продольной сжимающей силы в его обделке

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  $\approx 25 \frac{\text{кНм}}{\text{м}}$  до  $100 \frac{\text{кНм}}{\text{м}}$ , опыт №\*16) приведет к увеличению внутренних усилий в обделке всего до 12% при средних значениях исследуемых факторов, а суммарных осадок поверхности земли (табл. 2), обусловленных строительством тоннеля, - в 4...6 раз, что может спровоцировать повреждения самого здания, прилегающих дорожного полотна и рельсовых путей.

### Выводы

- Предложенная методика позволяет достаточно быстро определить внутренние усилия в обделке тоннеля без выполнения громоздких расчетов в грунтовых условиях южного региона Украины, а также спрогнозировать возможные последствия в процессе его прокладки, решать оптимизационные задачи.

### Список используемой литературы

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. – 10 с.
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. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский [2-е изд. испр. и доп.]. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 215 с.

**Карпюк Василь Михайлович** – д.т.н., професор, завідувач кафедру опору матеріалів Одеської державної академії будівництва і архітектури.

**Менейлюк Олександр Іванович** – д.т.н., професор, завідувач кафедру технологія будівельного виробництва Одеської державної академії будівництва і архітектури.

**Карпюк Ірина Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри основ та фундаментів Одеської державної академії будівництва і архітектури.

**Сурду Олексій Васильович** – магістрант кафедри залізобетонних і камінних конструкцій Одеської державної академії будівництва і архітектури.

**Карпюк Василій Михайлович** – д.т.н., професор, заведуючий кафедрой сопротивления материалов ОГАСА.

**Менейлюк Александр Иванович** – д.т.н., професор, заведуючий кафедрой технология строительства производств ОГАСА.

**Карпюк Ирина Анатольевна** – к.т.н., доцент кафедры оснований и фундаментов ОГАСА

**Сурду Алексей Васильевич** – магистрант ОГАСА.

**Karpiuk Vasily** – Professor, Head of the Department of Strength of Materials.

**Meneylyuk Alexander** – Professor, Head of the technology of building production.

**Karpiuk Irina** – Associate Professor, Department of bases and foundations.

**Surdu Oleksiy** – Master Chair of reinforced concrete and masonry structures.