УДК 624.131

**А.Н. Богомолов, С.А. Калиновский, Р.С. Нестеров,
А.В. Прокопенко, В.В. Подтелков**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет,
Волгоград, Россия

**ЗАВИСИМОСТЬ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ
ЗАГЛУБЛЕННОГО ФУНДАМЕНТА, РАСПОЛОЖЕННОГО
НАД ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКОЙ,
ОТ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО
ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА**

Приводятся результаты исследования влияния величины коэффициента бокового давления грунта на устойчивость системы «основание фундамента–подземная выработка» при расположении выработки непосредственно под фундаментом. При решении поставленной задачи использована компьютерная программа, в которой формализован метод конечных элементов. Установлено, что коэффициент бокового давления грунта оказывает существенное влияние на процесс зарождения и развития областей пластических деформаций в грунтовом массиве, вмещающем указанную систему и, как следствие, на величины расчетного сопротивления и предельно допустимой нагрузки. Уменьшение величины расчетного значения коэффициента бокового давления с 0,8 до 0,4, т. е. на 50 %, влечет за собой при всех прочих равных условиях, рассмотренных в работе, уменьшение величины предельно допустимой нагрузки на 12,77–67,5 %, а величины расчетного сопротивления основания – на 12,94–66,0 %.

Ключевые слова: система «основание фундамента – подземная выработка», процесс образования и развития областей пластических деформаций, коэффициент бокового давления грунта, расчётное сопротивление, предельно допустимая нагрузка.

**A.N. Bogomolov, S.A. Kalinovsky, R.S. Nesterov,
A.V. Prokopenko, V.V. Podtelkov**

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering,
Volgograd, Russian Federation

**DEPENDENCE OF CARRYING CAPACITY OF BASIS RECESSED
FOUNDATION LOCATED ON THE SQUARE UNDERGROUND
WORKINGS ON THE VALUE OF THE COEFFICIENT
OF LATERAL EARTH PRESSURE**

The results of studies of the effect of the coefficient of lateral earth pressure on the stability of the system, "the foundation base – winze" at the location of production directly under the foundation. In solving the problem uses computer program, which formalized the finite element method. Found that the coefficient of lateral earth pressure has a significant influence on the origin and development of areas of plastic deformation in a ground array, which holds the specified system and, as a consequence, the

magnitude of the calculated resistance and maximum permissible load. Decrease in the estimated value of the coefficient of lateral pressure from 0,8 to 0,4, that is at 50 %, entails all other things being equal, considered in work, a reduction in the maximum permissible load on 12,94–66,0 % and the values of the design resistance of the base – at 12,77–67,5 %.

Keywords: "subfoundation – winze" process of formation and development of the plastic deformation region, the coefficient of lateral earth pressure, the calculated resistance, maximum allowable load.

Актуальность рассматриваемой темы определяется необходимостью оценки взаимного влияния фундаментов вновь возводимых зданий и существующих подземных коммуникаций. Одна из задач, которую приходится в этом случае решать, определение расчётного сопротивления и предельно допустимой нагрузки на фундамент, расположенный в грунтовом массиве, ослабленном подземной выработкой.

Величина расчетного сопротивления основания определена из условия развития областей пластических деформаций (ОПД), сформировавшихся под краями фундамента, на глубину, равную четверти ширины фундамента ниже его подошвы.

Величина предельно допустимой нагрузки на основание соответствует такому значению равномерно распределенной вертикальной нагрузки $q_{пл}$, при котором происходит смыкание ОПД под подошвой фундамента или их смыкание с ОПД, формирующимися в окрестностях ствола выработки.

В работах [1, 2] проведена оценка влияния величины коэффициента бокового давления грунта основания на величины предельно допустимой нагрузки и расчётного сопротивления основания заглубленного ленточного фундамента и величин расстояний между фундаментом и подземной горизонтальной выработкой, на которых их взаимным влиянием можно пренебречь. Было показано, что коэффициент бокового давления оказывает значительное влияние на эти величины. Вместе с тем в справочно-нормативной литературе величина коэффициента бокового давления грунта при подобных расчётах не учитывается.

В данной работе приведены результаты исследования зависимости расчетного сопротивления и предельно допустимой нагрузки на основание заглубленного ленточного фундамента, ослабленного подземной горизонтальной выработкой квадратного сечения, от величины коэффициента бокового давления вмещающего массива грунта. Принято, что выработка имеет сечение в виде квадрата со стороной $d = 3$ м. Она располагается таким образом, что её вертикальная ось симметрии во всех случаях совпадает с осью симметрии фундамента.

В качестве инструмента исследования использована компьютерная программа «Устойчивость. Напряжённно-деформируемое состояние»¹, разработанная в ВолгГАСУ, в которой для определения напряжений формализован метод конечных элементов. С ее помощью проведено моделирование процесса образования областей пластических деформаций под подошвой фундамента и в окрестностях подземной выработки при различных значениях переменных расчетных параметров.

Рис. 1. Геометрические размеры механико-математической модели (а) и фрагмент расчётной схемы (б) для решения задачи об определении расчётного сопротивления и предельно допустимой нагрузки на основание фундамента в системе «фундамент – подземная выработка» при $H = d$

Механико-математическая модель и ее основные геометрические размеры приведена на рис. 1, а. Расчетная схема МКЭ состоит из 107424 одинаковых треугольных элементов, сопряжённых в 54374 узлах, а ширина матрицы жесткости системы равна 354.

Все вычисления проведены при трех значениях величины $\xi_0 = 0,4; 0,6; 0,8$ [3]. В качестве переменных расчётных параметров приняты: угол внутреннего трения грунта $\varphi = 7; 15; 22$ и 30° ; расстояние от подошвы фундамента до потолочины выработки $H = b; 2b; 3b; 4b; 5b; 6b$ (b – половина ширины подошвы фундамента, принимавшей значения

¹ Устойчивость (Напряжённно-деформированное состояние): свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009613499 / А.Н. Богомолов [и др.]. № 2009612297; заявл. 19.05.2009 ; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. – 1 с.

$2b = 3$ м и $2b = 2$ м); удельное сцепление C изменяется так, что величина приведенного давления связности $\sigma_{св} = C(\gamma h \operatorname{tg} \varphi)^{-1} = 0,25; 3,5; 7,0; 10,55$. Принято, что среднее значение объемного веса грунта γ постоянно и равно 2 т/м^3 .

Принято, что величине расчетного сопротивления основания соответствует такая величина интенсивности равномерно распределенной нагрузки q , при которой области пластических деформаций развиваются вглубь основания на $0,25$ ширины фундамента [2]. В качестве предельно допустимой нагрузки принимается такое значение q , при котором происходит смыкание областей пластических деформаций, образующихся под краями подошвы фундамента с ОПД, развивающимися вокруг ствола подземной выработки, как это показано на рис. 2.

Рис. 2. Области пластических деформаций в активной зоне системы «заглубленный фундамент – подземная выработка» для сочетания расчётных параметров $2b = d = 3$ м, $\varphi = 15^\circ$, $\sigma_{св} = 7,0$, $\xi_0 = 0,8$ в момент смыкания ОПД в активной зоне системы при действии равномерно-распределённой нагрузки интенсивностью $q = 9,43\gamma h$ (а) и в момент, когда $H_{опд} = 0,5b$ при $q = 8,61\gamma h$ (б)

Анализ и обработка результатов вычислений позволили построить графические зависимости вида $\ln q = f(\xi_0)$, часть из которых изображены на рис. 3. Из анализа этих зависимостей видно, что величины предельно допустимой нагрузки $P_{пд}$ и расчетного сопротивления R при всех прочих равных условиях являются некоторыми функциями коэффициента бо-

кового давления грунта. Установлено, что полученные кривые с достоверностью $R^2 = 0,984 - 1,0$ аппроксимируются прямыми вида:

$$\ln P_{\text{пд}} = m\xi_0 + n, \quad (1)$$

$$\ln R = m^* \xi_0 + n^*, \quad (2)$$

где m ; m^* и n ; n^* – безразмерные (в долях γH) коэффициенты; R, P – безразмерные (в долях γH) расчетное сопротивление и предельно допустимая нагрузка; ξ_0 – коэффициент бокового давления грунта (табл. 1, 2).

Рис. 3. Графики зависимости вида $\ln q = f(\xi_0)$ при $2b = d = 3$ м, $\varphi = 15^\circ$, $\sigma_{\text{св}} = 7,0$ для случая смыкания ОПД в активной зоне рассматриваемой системы (а) и при $H_{\text{ОПД}} = 0,5b$ (б)

Коэффициенты m ; m^* и n ; n^* , входящие в формулы (1) и (2), для условий и значений переменных расчетных параметров, принятых в данной работе, приведены в табл. 3 и 4. Для определения этих коэффициентов для промежуточных значений переменных расчетных параметров можно использовать численные значения этих коэффициентов, взятых из табл. 3, 4, и метод линейной интерполяции.

Таблица 1

Численные значения $R_{\text{пд}}$ при $2b = d = 3$ м, $\varphi = 15^\circ$, $\sigma_{\text{св}} = 7,0$

H/d	ξ_0					
	0,4		0,6		0,8	
	q	$\ln q$	q	$\ln q$	q	$\ln q$
$H = d$	2,81	1,03318	3,04	1,11186	3,33	1,20297
$H = 2d$	4,93	1,59534	5,49	1,70293	5,89	1,77326
$H = 3d$	7,7	2,04122	8,54	2,14476	9,43	2,2439
$H = 4d$	9,64	2,26592	11,58	2,44928	13,46	2,59972
$H = 5d$	10,21	2,32337	12,43	2,52011	14,75	2,69124
$H = 6d$	10,63	2,36368	12,74	2,54475	15,55	2,74406

Таблица 2

Численные значения R при $2b = d = 3$ м, $\varphi = 15^\circ$, $\sigma_{\text{св}} = 7,0$

H/d	ξ_0					
	0,4		0,6		0,8	
	q	$\ln q$	q	$\ln q$	q	$\ln q$
$H = d$	—	—	—	—	—	—
$H = 2d$	—	—	—	—	—	—
$H = 3d$	7,27	1,98376	8,01	2,08069	8,61	2,15292
$H = 4d$	8,21	2,10535	9,13	2,21157	9,93	2,29556
$H = 5d$	8,54	2,14476	9,5	2,25129	10,5	2,35138
$H = 6d$	8,65	2,15756	9,63	2,26488	10,68	2,36837

Таблица 3

Значения коэффициентов m и n

$\sigma_{\text{св}}$	m				n			
	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 15^\circ$	$\varphi = 22^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 15^\circ$	$\varphi = 22^\circ$	$\varphi = 30^\circ$
$H = b$								
0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
3,5	0,63	0,449	0,459	0,627	0,532	0,057	0,786	1,089
7,0	0,37	0,424	0,443	0,468	0,022	0,861	1,592	1,796
10,55	0,346	0,375	0,397	0,405	0,420	1,383	1,999	2,224
$H = 2b$								
0,25	—	—	—	1,152	—	—	—	—0,029
3,5	—	0,481	0,499	0,653	—	0,863	1,27	1,576
7,0	0,416	0,444	0,457	0,484	0,731	1,423	1,895	2,297

Окончание табл. 3

10,55	0,357	0,391	0,408	0,427	1,063	1,837	2,311	2,713
$H = 3b$								
0,25	–	–	–	1,494	–	–	–	0,279
3,5	0,463	0,64	0,69	0,757	0,532	1,159	1,649	2,082
7,0	0,458	0,506	0,536	0,61	0,997	1,839	2,344	2,767
10,55	0,42	0,43	0,469	0,551	1,346	2,270	2,765	3,179
$H = 4b$								
0,25	–	–	–	1,964	–	–	–	0,368
3,5	0,729	0,973	1,067	1,148	0,553	1,231	1,735	2,191
7,0	0,693	0,853	0,897	0,966	1,041	1,929	2,442	2,879
10,55	0,688	0,836	0,854	0,91	1,429	2,281	2,828	3,282
$H = 5b$								
0,25	–	–	–	2,504	–	–	–	0,398
3,5	0,886	1,172	1,273	1,543	0,621	1,237	1,765	2,209
7,0	0,864	0,919	1,036	1,329	1,057	1,959	2,46	2,887
10,55	0,858	0,908	0,938	1,264	1,438	2,287	2,874	3,289
$H = 6b$								
0,25	–	–	–	2,264	–	–	–	0,408
3,5	0,92	1,21	1,278	1,566	0,625	1,241	1,782	2,216
7,0	0,883	0,951	1,044	1,362	1,063	1,980	2,469	2,891
10,55	0,878	0,918	0,957	1,279	1,441	2,289	2,877	3,298

Таблица 4

Значения коэффициентов m^* и n^*

σ_{CB}	m^*				n^*			
	$\varphi = 7^0$	$\varphi = 15^0$	$\varphi = 22^0$	$\varphi = 30^0$	$\varphi = 7^0$	$\varphi = 15^0$	$\varphi = 22^0$	$\varphi = 30^0$
$H = 2b$								
0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
3,5	–	–	–	–	–	–	–	–
7,0	–	–	–	0,408	–	–	–	2,337
10,55	–	–	0,308	0,383	–	–	2,371	2,727
$H = 3b$								
0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
3,5	–	0,517	0,557	0,638	–	1,208	1,668	2,067
7,0	–	0,422	0,467	0,513	–	1,818	2,277	2,712
10,55	0,341	0,356	0,375	0,469	1,356	2,215	2,708	3,103
$H = 4b$								
0,25	–	–	–	1,219	–	–	–	0,698

Окончание табл. 4

3,5	–	0,571	0,608	0,677	–	1,338	1,800	2,23
7,0	0,394	0,475	0,523	0,584	1,099	1,918	2,388	2,834
10,55	0,422	0,428	0,459	0,524	1,445	2,291	2,789	3,234
<i>H = 5b</i>								
0,25	–	–	–	1,264	–	–	–	0,801
3,5	–	0,63	0,664	0,695	–	1,354	1,822	2,287
7,0	0,469	0,516	0,563	0,596	1,157	1,939	2,412	2,892
10,55	0,451	0,471	0,521	0,566	1,465	2,300	2,796	3,265
<i>H = 6b</i>								
0,25	–	–	–	1,290	–	–	–	0,820
3,5	–	0,656	0,692	0,723	–	1,357	1,825	2,292
7,0	0,486	0,527	0,583	0,622	1,161	1,947	2,423	2,895
10,55	0,46	0,488	0,542	0,588	1,47	2,303	2,798	3,268

Анализ результатов расчетов при помощи формул (1) и (2) и данных, помещенных в табл. 3 и 4, величина расчетного сопротивления и несущей способности основания заглубленного ленточного фундамента, ослабленного подземной горизонтальной выработкой квадратного сечения, зависит от величины коэффициента бокового давления вмещающего массива грунта. Так, для условий и численных значений переменных расчетных параметров, принятых в настоящей работе, величина предельно допустимой нагрузки и расчетного сопротивления при уменьшении величины коэффициента бокового давления грунта от 0,8 до 0,4 снижаются на 12,94–66,0 % и 12,77–67,5 % соответственно.

Библиографический список

1. Коэффициент бокового давления грунта как одна из величин, определяющих несущую способность однородного основания ленточного фундамента / А.Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. – 2013. – Вып. 31 (50). – С. 251–257.
2. Оценка влияния коэффициента бокового давления грунта на устойчивость системы «основание фундамента – подземная выработка» / А.Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архит. – 2013. – Вып. 32(51). – С. 16–32.
3. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов /А.Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2007. – Вып. 6(23). – С. 110–114.

References

1. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Bogomolova O.A., Prokopenko A.V. Koeffitsient bokovogo davleniya grunta kak odna iz velichin, *opredelyayushchikh* nesushchuyu sposobnost' odnorodnogo osnovaniya lentochnogo [Coefficient of lateral earth pressure as one of values that determine bearing capacity of entire base of strip foundation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 31(50), vol. 2. pp. 251-257.

2. Bogomolov A.N., Kalinovskiy S.A., Ermakov O.V., Solov'ev A.V., Nesterov R.S. Ocenka vliyaniya koeffitsienta bokovogo davleniya grunta na ustoychivost sistemy «osnovanie fundamenta – podzemnaya vyrabotka» [Assessment of influence of the coefficient of lateral earth pressure on stability of “foundation base – underground mine” system], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 32(51). pp. 16-32.

3. Bogomolov A.N. [et al.]. K voprosu o minimalnykh znacheniyakh koeffitsienta bokovogo davleniya gruntov [Question of the minimum values of the of lateral earth pressure coefficient]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2007, no. 6 (23). pp. 110-114.

Об авторах

Богомолов Александр Николаевич (Волгоград, Россия) – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Калиновский Сергей Андреевич (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: sk0522@yandex.com

Нестеров Родион Сергеевич (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: info@vgasu.ru

Прокопенко Алексей Васильевич (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: info@vgasu.ru

Подтелков Василий Владимирович (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, докторант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: info@vgasu.ru

About the authors

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich (Volgograd, Russian Federation) – Doctor of Technical, Professor, vice rector of the science, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Kalinovsky Sergey Andreevich (Volgograd, Russian Federation) – Ph. D in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Hydraulic and Earthwork Structures, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: sk0522@yandex.com

Nesterov Rodion Sergeevich (Volgograd, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Hydraulic and Earthwork Structures, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: rodionnesteroff@mail.ru

Prokopenko Alexey Vasilievich (Volgograd, Russian Federation) – Doctoral Student Department of Hydraulic and Earthwork Structures, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: info@vgasu.ru

Podtelkov Vasily Vladimirovich (Volgograd, Russian Federation) – Ph. D in Technical Sciences, Postdoctoral Student, Department of Hydraulic and Earthwork Structures, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: info@vgasu.ru

Получено 28.03.2014