

УДК 624.131.53

И.В. Войтенко

*Одесская Государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*

## К ВОПРОСУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С АНИЗОТРОПНОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ

*В условиях интенсификации подземного строительства актуальной является задача снижения себестоимости заглубленных конструкций, взаимодействующих с неоднородными грунтовыми основаниями. Автором предлагается методика определения бокового давления грунта с учетом его анизотропных свойств. В работе приведены результаты численного исследования влияния анизотропии прочности грунтового основания на величину бокового давления по контакту с подпорной стенкой. Осуществляется анализ этого влияния и рекомендации по использованию рассмотренной методики.*

**Ключевые слова:** анизотропия прочностных характеристик, заглубленные конструкции, боковое давление грунта, неоднородное основание.

### Постановка проблемы и анализ последних публикаций

В современных условиях одним из приоритетных направлений градостроительства является освоение подземного пространства [1]. Особенностью данного направления является рациональное освоение городской среды в сочетании с бережным отношением к исторической части города. Добавим также, что стоимость строительства подземных сооружений в несколько раз превышает данный показатель для надземных сооружений. В связи с этим, актуальным является поиск резервов прочности при проектировании новых и реконструкции существующих строительных объектов.

В последнее время интенсивно развивается строительство транспортных (паркинги, тоннели, подземные переходы) и инженерных объектов (тоннели и коллекторы тепло-, газо-, электросетей и водопровода). К подземным конструкциям относятся также стены подвалов, крепления стен котлованов и др. Актуальным в условиях поднятия уровня подземных вод является использование конструкций типа «стена в грунте».

Характерной особенностью упомянутых конструкций является восприятие бокового давления грунта, характер которого определяется направлением перемещения стенки.

Современные грунтовые условия, характеризующие взаимодействие фундаментных конструкций с основанием, как правило, являются сложными ввиду особенностей литогенеза либо под влиянием техногенных факторов.

Как отмечают отечественные и зарубежные источники [2-5], результаты испытаний грунтовых образцов демонстрируют существенную анизотропию прочностных характеристик в

зависимости от ориентации площадки сдвига. Причинами анизотропии грунтовых оснований считают присущую большинству отложений слоистость, а также свойственную грунтам определенную ориентацию частиц в пространстве [6, 7].

Проектные нормы не регламентируют проектирование сооружений в условиях взаимодействия с анизотропными основаниями. Ранее была предложена методика определения бокового давления грунта с учетом анизотропии прочностных характеристик, в основе своей опирающаяся на основные положения классической теории Ш. Кулона [8-10]. Предполагается, что поверхности скольжения являются плоскостями. Выводы базировались на рассмотрении равновесия предельных призм с учетом внутренних сил связности в соответствии с теоремой Како. В результате получены зависимости для определения бокового давления неоднородного анизотропного грунтового основания при произвольной ориентации плоских границ слоев.

Необходимо отметить, что в современных условиях техногенных катастроф актуальным является учет сейсмических факторов, также нашедший отражение в предложенной методике.

Целью данной статьи является оценка влияния анизотропии прочностных характеристик неоднородной грунтовой среды на величину бокового давления грунта посредством численного моделирования.

**Изложение основного материала**

Активное давление произвольного n-го грунтового слоя, преобладающее при взаимодействии с подземными конструкциями, определяется следующим образом:

$$E_{a,n} = \gamma_n h_n^2 N_{\gamma,n} (1 + N_{cor,n}) + q_{n,c} h_n N_{q,n} + c_n (\beta_{1,n}) h_n N_{c,n} \quad (1),$$

где  $\gamma_n$  – удельный вес n-го слоя;

$h_n$  – высота слоя при ее проекции на вертикаль;

$c_n = c_n(\beta_{1,n})$  – базовое сцепление на поверхности n-го слоя при ее ориентации  $\beta_{1,n}$ ;

$$N_{\gamma,n} = \frac{1}{2} \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\varphi_n(\beta_{2,n}) - \omega_{\gamma,n} - \beta_{2,n})}{\sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (2),$$

$$N_{q,n} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,1} - \beta_{2,n} - \rho_n - \omega_{q,n} + \varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (3),$$

$$N_{c,n} = \left\{ \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,n} - \beta_{2,n} + \varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,n}) \text{tg} \varphi_n(\beta_{1,n})} + \frac{c_n(\beta_3) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n})}{c_n(\beta_{1,n}) \text{tg} \varphi_n(\beta_3)} + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1})} (1 + N_{cor,n}) \left[ \frac{c_n(\beta_{2,n})}{c_n(\beta_{1,n})} \text{ctg} \varphi_n(\beta_{2,n}) - \text{ctg} \varphi_n(\beta_{1,n}) \right] \right\} \times \frac{1}{\sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (4),$$

$$N_{cor,n} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,n} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1})} \quad (5),$$

$\beta_{2,n}$  – угол ориентации поверхности обрушения;

$\omega_{\gamma,n}$ ,  $\omega_{q,n}$  – углы сейсма соответственно для объемных сил и нагрузки  $q_{n,c}$  относительно направления их действия;

$\rho_n$  – угол ориентации нагрузки  $q_n$  относительно нормали к поверхности n-го слоя;

$\delta_n(\beta_3)$  – угол шероховатости (трения грунта о материал стенки);

$q_{n,c}$  – поверхностная равномерно распределенная над n-ым слоем нагрузка, учитывающая вес верхних слоев, поверхностную нагрузку  $q$  и сейсмическое воздействие;

$\beta_3$  – ориентация стенки к оси отсчета;

$\beta_{1,1}$ <sup>1</sup> – ориентация поверхности основания к горизонтальной оси отсчета;

$\beta_{1,n}$  – ориентация поверхности произвольного n-го слоя.

Анизотропия прочностных свойств произвольного грунтового слоя представлена соответствующими годографами угла внутреннего трения  $\varphi_n(\beta)$  и сцепления  $c_n(\beta)$ , которые удовлетворяют условию:

$$\varphi_n(\beta) = \varphi_n(\beta + \pi); \quad c_n(\beta) = c_n(\beta + \pi) \quad (6).$$

Угол  $\beta_{2,n}$ , соответствующий экстремальному давлению, неизвестен и определяется методом итераций, что предопределяет целесообразность использования компьютера.

Полученные решения могут быть использованы для решения практических задач взаимодействия сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях.

С этой целью был разработан программный комплекс, позволяющий внедрить рассматриваемую методику в практику проектирования сооружений, воспринимающих боковое давление слоистой грунтовой среды с учетом прочностной анизотропии.

На рис. 1 представлена блок-схема компьютерной программы.

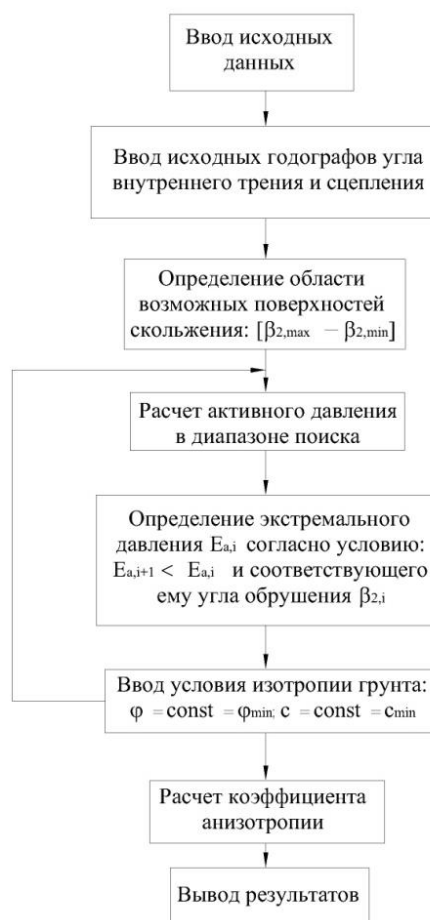


Рис. 1. Укрупненная блок-схема программы расчета активного давления анизотропного по сопротивлению сдвигу неоднородного грунта на подпорную стенку.

<sup>1</sup> В данном и всех последующих параметрах первый индекс обозначает номер параметра, второй - номер слоя.

Соответствующий алгоритм представлен в [11]. Разработанная компьютерная программа позволяет не только определять боковое давление грунта на подпорные стенки, но и оценивать влияние анизотропии на величину полученных параметров.

Для оценки влияния анизотропии определяется коэффициент анизотропии n-го слоя:

$$k_{a,n} = E_{a,n}(\text{аниз.}) / E_{a,n}(\text{изотр.}) \quad (7),$$

где  $E_{a,2}(\text{аниз.})$  – активное давление грунта нижнего слоя, определяемое с учетом прочностной анизотропии;

$E_{a,2}(\text{из.})$  – активное давление грунта нижнего слоя, определяемое в условиях изотропной грунтовой среды при  $\varphi_2 = \varphi_{2,\min} = \text{const}$ ,  $c_2 = c_{2,\min} = \text{const}$ .

Покажем влияние анизотропии прочности на величину активного давления грунта. Рассмотрим вертикальную, идеально гладкую стенку, контактирующую с двухслойной грунтовой средой, анизотропия прочности которой представлена кусочно-линейными годографами угла внутреннего трения и сцепления (рис. 2).

Ориентация поверхностей слоев горизонтальна, нагрузка на поверхности грунтового массива отсутствует. Сейсмическое воздействие не учитывается. Мощности слоев соответственно  $h_1 = 8$  м.,  $h_2 = 7$  м. Удельный вес грунтов  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,7$  кН/м<sup>3</sup>.

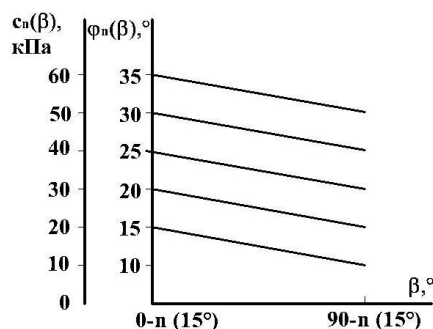


Рис. 2. Кусочно-линейные годографы угла внутреннего трения и сцепления.

В ходе компьютерных расчетов определялось давление нижнего слоя  $E_{a,2}(\text{аниз.})$ , соответствующее плоскости скольжения, ориентированной под углом  $\beta_{2,2}$  при различных показателях анизотропии прочности  $\varphi_2(\beta)$  и  $c_2(\beta)$ . Анизотропия верхнего слоя  $\varphi_1(\beta)$  и  $c_1(\beta)$  при этом принималась постоянной.

Для оценки влияния анизотропии определялось активное давление изотропного грунта  $E_{a,2}(\text{изотр.})$  при минимальной прочности соответствующего годографа с последующим определением коэффициента анизотропии нижнего слоя:

$$k_{a,2} = E_{a,2}(\text{аниз.}) / E_{a,2}(\text{изотр.}).$$

Заметим, что были произведены расчеты давлений для связной и сыпучей грунтовой среды.

Результаты численных исследований представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Определение активного давления нижнего слоя при характеристиках прочностной анизотропии верхнего слоя  $\varphi_1(\beta) = 15^0 - 10^0$  и  $c_2(\beta) = 60 - 50$  кПа

Кусочно-линейные годографы	$\beta_{2,2}(\text{аниз.}),$ град	$E_{a,2}(\text{аниз.}),$ кН.	$\beta_{2,2}(\text{изотр.}),$ град	$E_{a,2}(\text{изотр.}),$ кН.	$k_{a,2}$
$\varphi_2(\beta) = 15^0 - 10^0$ $c_2(\beta) = 60 - 50$ кПа	233	-136,85	230	376,17	-0,36
$\varphi_2(\beta) = 20^0 - 15^0$ $c_2(\beta) = 50 - 40$ кПа	236	211,26	232	375,94	0,56
$\varphi_2(\beta) = 25^0 - 20^0$ $c_2(\beta) = 40 - 30$ кПа	238	331,04	235	376,88	0,88
$\varphi_2(\beta) = 30^0 - 25^0$ $c_2(\beta) = 30 - 20$ кПа	240	381,44	235	376,88	1,01
$\varphi_2(\beta) = 35^0 - 30^0$ $c_2(\beta) = 20 - 10$ кПа	243	403,86	240	375,34	1,08

Определение активного давления нижнего слоя при характеристиках прочностной анизотропии верхнего слоя  $\varphi_1(\beta)=15^0-10^0$  и  $c_2(\beta)=0$  кПа

Кусочно-линейные годографы	$\beta_{2,2}$ (аниз.), град	$E_{a,2}$ (аниз.), кН.	$\beta_{2,2}$ (изотр.), град	$E_{a,2}$ (изотр.), кН.	$k_{a,2}$
$\varphi_2(\beta)=15^0-10^0$ $c_2(\beta)=60-50$ кПа	235	895,31	230	963,55	0,93
$\varphi_2(\beta)=20^0-15^0$ $c_2(\beta)=50-40$ кПа	236	750,45	232	805,69	0,93
$\varphi_2(\beta)=25^0-20^0$ $c_2(\beta)=40-30$ кПа	238	626,37	235	670,96	0,93
$\varphi_2(\beta)=30^0-25^0$ $c_2(\beta)=30-20$ кПа	240	519,66	237	555,33	0,94
$\varphi_2(\beta)=35^0-30^0$ $c_2(\beta)=20-10$ кПа	242	427,67	240	456,17	0,94

Заметим, что изменение параметров анизотропии верхнего слоя не влияет на результаты расчетов для нижнего слоя.

Анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Учет прочностной анизотропии существенно влияет на показатели бокового давления грунта, при этом изотропное давление для связной грунтовой среды может как превышать соответствующий анизотропный показатель, так и принимать меньшие значения.

Следовательно, проектирование распорных сооружений без учета анизотропии прочностных характеристик в одних случаях ведет к перерасходу материала, в других же может служить причиной нарушения устойчивости сооружений.

2. Сцепление грунта оказывает значительное влияние на величину бокового давления, в некоторых случаях преобладая над весовыми параметрами предельной грунтовой призмы.

3. Коэффициент влияния анизотропии в рыхлой среде всегда меньше 1, т.е. активное давление в анизотропной среде всегда меньше соответствующего показателя для случая изотропии с минимальным показателем прочности.

4. При больших показателях прочности для связных грунтов влияние анизотропии уменьшается, в то время как для рыхлой среды варьирование характеристик прочности практически не меняет коэффициент влияния анизотропии.

5. Предложенную методику рекомендуется использовать для проектирования ответственных сооружений, контактирующих с грунтовым основанием в пределах значительной мощности.

### Выводы

Результаты численного моделирования взаимодействия подпорной стенки с неоднородным анизотропным грунтовым основанием демонстрируют влияние анизотропии прочности на величину бокового давления грунта. В ряде случаев давление грунтовой среды, определяемое с учетом анизотропных свойств, значительно меньше соответствующих показателей в условиях изотропии прочности. Таким образом, учет анизотропных свойств для ответственных сооружений позволит снизить материалоемкость конструкций, что особенно актуально в условиях интенсификации подземного строительства.

### Литература

1. Шашенко А.Н. Комплексное решение вопросов развития города Днепропетровска с учетом освоения подземного пространства / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, М.А. Выгодин // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного Університету залізничного транспорту ім. Академіка В. Лазаряна. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 126-131.
2. Винников Ю.Л. Исследования анизотропии лессовых грунтов вокруг фундаментов в пробитых скважинах / Ю.Л. Винников // Изв. вузов. Строительство. – 1999. - № 4. – С. 123 – 128.
3. Коробова О.А. Результаты экспериментальных исследований анизотропных лессовидных грунтов / О.А. Коробова // Изв. вузов. Строительство. – 2003. - № 2. – С. 128 – 130.
4. Builes M.A. Inherent anisotropy in allophane clay in Columbia / Builes M.A., Gomes D.V., Millan A.A. // Proc. of the 17<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, 2009. – P. 193 – 196.
5. The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay / [Grammatikopoulou A., Schroeder F. C.,

- Kovacevic N., Germano V., Gasparre A. // *Proc. of the 15<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks"*. – Athens, 2011. – P. 545 – 550.
6. Орнатский Н.В. Механика грунтов / Н.В. Орнатский. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 447 с.
7. Гениев Г.А. Плоская деформация анизотропной сыпучей среды / Г.А. Гениев // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 1986. - № 5. - С. 33-35.
8. Школа А.В. Боковое давление анизотропного грунта на сооружения, возведенные методом «стена в грунте» с учетом сейсмических воздействий / А.В. Школа, Е.В. Гришко // *Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: докл. науч.-техн. конф.* – Полтава, 1991. - С. 264-273.
9. Школа А.В. Учет анизотропии многослойного грунта при определении активного давления на подпорные стены с учетом сейсмических воздействий / А.В. Школа, И.В. Войтенко // *Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры*. - Выпуск №4. - Одесса, 2001. - С. 394-407.
10. Школа, А.В. Боковое давление анизотропных грунтов на сооружения / А.В. Школа. – Одесса, МАГ ВТ, 2012. – 219с.
11. Войтенко И.В. Алгоритм расчета бокового давления грунта анизотропных многослойных оснований / И.В. Войтенко // *Вісник Одеського Національного Морського Університету*. - Вип. №10. - Одесса, 2003. С. 137-141.

#### References

1. Shashenko A.N., Solodyankin A.V., Vygodin M.A. (2012). *The complex issues of development of the city of Dnipropetrovsk taking into account mastering of underground space. Collected papers of Dnipropetrovsk University of railway transport Ak. Lazaryan V. Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 126-131.
2. Vinnikov Y.L. (1999). *Researches of anisotropy of loess soils around the foundations in the penetration holes. "Proceedings of the high school. Building – 1999"*, 4, 123 - 128.
3. Korobova O.A. (2003). *Results of experimental researches of anisotropic loesslike soils. "Proceedings of the high school. Building – 2003"*, 2, 128 - 130.

4. Builes M.A., Gomes D.V., Millan A.A. (2009). *Inherent anisotropy in allophane clay in Columbia.* *Proc. of the 17<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria*, 193 – 196.
5. Grammatikopoulou A., Schroeder F. C., Kovacevic N., Germano V., Gasparre A. (2011). *The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay.* *Proc. of the 15<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks – Athens"*, 545 – 550.
6. Ornatskiy N.V. (1962). *Mechanics of soils*. Moscow: Moscow State University.
7. Geniev G.A. (1986). *Flat deformation of anisotropic friable environment. Structural mechanics and calculation of buildings*, 5, 33-35.
8. Shkola A.V., Grishko E.V. (1991). *Lateral pressure of anisotropic soil on buildings, erected by method «wall in soil» taking into account seismic influences. Effective foundations, erected without the coulisse of soils "Proceedings of the Scientific and Technical Conference, Poltava"*, 264-273.
9. Shkola A.V., Voytenko I.V. (2001). *Account of anisotropy of multi-layered soil at determination of active pressure on retaining walls taking into account seismic influences. "Bulletin of the Odessa state academy of building and architecture - 2001"*, 4, 394-407.
10. Shkola A.V. (2012). *Lateral pressure of anisotropic soils on buildings. International Association of hydraulic engineers of water transport, Odessa, Ukraine.*
11. Voytenko I.V. (2003). *Algorithm of calculation of lateral pressure of soil of anisotropic multi-layered basements. "Bulletin of Odessa National Marine University – 2003"*, 10, 137-141.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Школа, генеральный директор Международной ассоциации гидротехников водного транспорта, Одесса.

**Автор:** ВОЙТЕНКО Инга Владимировна кандидат технических наук, доцент кафедры оснований и фундаментов, Одесская государственная академия строительства и архитектуры.  
E-mail – voytinna@ukr.net.

#### TO QUESTION OF INTERACTION OF RECESSED CONSTRUCTIONS WITH ANISOTROPIC SOIL'S ENVIRONMENT

I.V. Voitenko

*In the conditions of intensification of underground building a task of reduce of prime price of recessed constructions, interactive with heterogeneous soil's basement is very actual. Heterogeneity of lithology composition causes anisotropy of strength characteristics of soil basements, depending of the orientation of ground of cut, which is confirmed by results of domestic and foreign experimental researches. Normative documents are developed without the account of anisotropic properties of soils, that in a certain degree influences on reliability of using methods of determination of the operating loadings. For underground constructions lateral pressure of soil is determinative power, characterized by direction of moving of strut buildings. Author offer the method of determination of lateral pressure of soil taking into account its anisotropic properties. Account of seismic factor, provided in the developed method is also actual in modern conditions. The resulting algorithm have allowed to develop the computer program for the calculation lateral pressure of anisotropic soil. The results of numeral researches of influence of strength anisotropy of soil's foundation on the size of lateral pressure on a contact with a retaining wall are leaded. Analysis of this influence and recommendation by the use of the considered method is carried in this publication.*

**Keywords:** anisotropic ground environment, hodographs of friction angle and cohesion, recessed construction, lateral pressure of soil.