

Пронозин Я.А., Кайгородов М.Д., Караулов А.М. Аналитическое определение параметров скважины при устранении неравномерной осадки фундаментов методом выбуривания грунта // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 40–48. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.04

Pronosin Y.A., Kaygorodov M.D., Karaulov A.M. The analytical determination of the parameters of the well while eliminating unequal settlement of foundations method of drilling-out of the soil. *Construction and Geotechnics*. 2020. Vol. 11. No. 2. Pp. 40-48. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.04



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 2, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.04

УДК 624.154.5

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИНЫ ПРИ УСТРАНЕНИИ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТОВ МЕТОДОМ ВЫБУРИВАНИЯ ГРУНТА

Я.А. Пронозин<sup>1</sup>, М.Д. Кайгородов<sup>1</sup>, А.М. Караулов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 25 января 2020

Принята: 20 марта 2020

Опубликована: 30 июня 2020

#### Ключевые слова:

неравномерная осадка, крен, выбуривание грунта, фундаменты мелкозаложенного, параметры бурения.

### АННОТАЦИЯ

Существующие подходы к снижению неравномерности осадок зданий и сооружений имеют свои преимущества и недостатки. Одним из перспективных методов снижения неравномерности осадок фундаментов мелкозаложенного, в основании которых залегают слабые пылевато-глинистые грунты, является опускание здания или его части. Эффект достигается путем выбуривания вертикальных скважин в непосредственной близости от фундамента со стороны наименьших осадок.

В разное время разработками методик расчета горизонтального и наклонного выбуривания скважин занимались отечественные и зарубежные ученые. Важным вопросом при применении данной технологии остается определение параметров бурения, влияния грунтовых характеристик и напряженного состояния грунтов вокруг скважины на процесс снижения неравномерности осадки. В статье рассматривается влияние прочностных характеристик грунтов на напряженное состояние грунтового массива вокруг скважины, а также влияние радиуса выбуриваемой скважины на формирование областей предельного состояния. Аналитическое решение основано на использовании известного соотношения для определения напряженного состояния вокруг скважины при прессиометрических испытаниях. Из данного соотношения определяются тангенциальные и радиальные напряжения, которые затем проверяются по условию закона прочности, тем самым формируется картина напряженного состояния вокруг скважины.

По представленной методике выполнены расчеты напряженного состояния грунта вокруг скважин, позволяющие рассчитывать зоны разрушения грунта и тем самым определять параметры скважин и геометрию их расположения в зависимости от поставленных целей, при регулировании осадок плитных фундаментов.

© ПНИПУ

© Пронозин Яков Александрович – доктор технических наук, профессор, OrcidID: 0000-0002-6173-2796, e-mail: [pronozinja@tyuiu.ru](mailto:pronozinja@tyuiu.ru).

Кайгородов Михаил Дмитриевич – аспирант, e-mail: [kajgorodovmd@tyuiu.ru](mailto:kajgorodovmd@tyuiu.ru).

Караулов Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, e-mail: [karaulov@stu.ru](mailto:karaulov@stu.ru).

Yakov A. Pronozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, OrcidID: 0000-0002-6173-2796, e-mail: [pronozinja@tyuiu.ru](mailto:pronozinja@tyuiu.ru).

Mikhail D. Kaygorodov – Postgraduate Student, e-mail: [kajgorodovmd@tyuiu.ru](mailto:kajgorodovmd@tyuiu.ru).

Alexander M. Karaulov – Doctor of Technical Sciences, Professor, [karaulov@stu.ru](mailto:karaulov@stu.ru).

## THE ANALYTICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE WELL WHILE ELIMINATING UNEQUAL SETTLEMENT OF FOUNDATIONS METHOD OF DRILLING-OUT OF THE SOIL

Y.A. Pronosin<sup>1</sup>, M.D. Kaygorodov<sup>1</sup>, A.M. Karaulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 25 January 2020

Accepted: 20 March 2020

Published: 30 June 2020

#### Keywords:

uneven settlement, roll, drilling out soil, shallow foundation, drilling parameters.

### ABSTRACT

Existing approaches which allow to reduce the settlement unevenness of buildings and structures have their own advantages and disadvantages. One of the promising methods for reducing shallow foundations the settlement unevenness, which are based on soft dust and clay soil, is the building or its part lowering. The effect is achieved by drilling vertical wellbores in the immediate proximity to the existing foundation from the side of the least settlement.

At different times, domestic and foreign scientists were engaged in to the methods of horizontal and inclined drilling of wellbores, an important issue, when applying this technology, is the determination of drilling parameters, the influence of soil characteristics and the stress state of the soil around the well, on the roll reduction process. The article considers the influence of the soil strength characteristics on the stress state of the soil which are surrounding the wellbore, and the effect of the drilled wellbore radius on the formation of the critical state regions. The analytical solution is based on the use of the well-known relationship for determining the stress state around the well during pressiometric tests. From this ratio, tangential and radial stresses are determined, which are then checked according to the condition of the law of strength, thereby forming a picture of the stress state around the well.

According to the presented methodology, the stress state of the soil around the wells was calculated, which allows calculating the zones of soil destruction and thereby determining the parameters of the wells and the geometry of their location depending on the goals, when regulating the sediment of slab foundations.

© PNRPU

---

## Введение

Актуальной проблемой в геотехнической практике является возникновение неравномерных осадок фундамента в ходе строительства и эксплуатации зданий и сооружений [1]. Превышение таких нормативных параметров [2], как крен, относительная неравномерность осадки и горизонтальные перемещения остова здания, влекут за собой невозможность ввода в эксплуатацию объектов строительства или существенное затруднение эксплуатации, вплоть до ее прекращения. Причины возникновения могут быть самыми различными, зависящими от широкого спектра объективных и субъективных факторов.

Технологии стабилизации деформаций грунтового основания способствуют лишь предупреждению их дальнейшего развития [3–5] и ликвидации причин деформаций, тогда как для устранения последствий неравномерных осадок в настоящее время на практике нашли место три основных подхода:

- подъем и выравнивание зданий с помощью домкратов [6–10] (рис. 1, а);
- опускание здания или его части за счет изменения прочностных и деформационных характеристик грунта основания (замачивание грунта) [11] (рис. 1, б);
- опускание здания или его части путем выбуривания грунта из-под подошвы фундамента [12–15] (рис. 1, в);

Ни один из этих методов не является универсальным. Применение каждого из способов в конкретном случае должно иметь как экономическое обоснование, так и обоснование с точки зрения простоты и безопасности технологии производства работ.

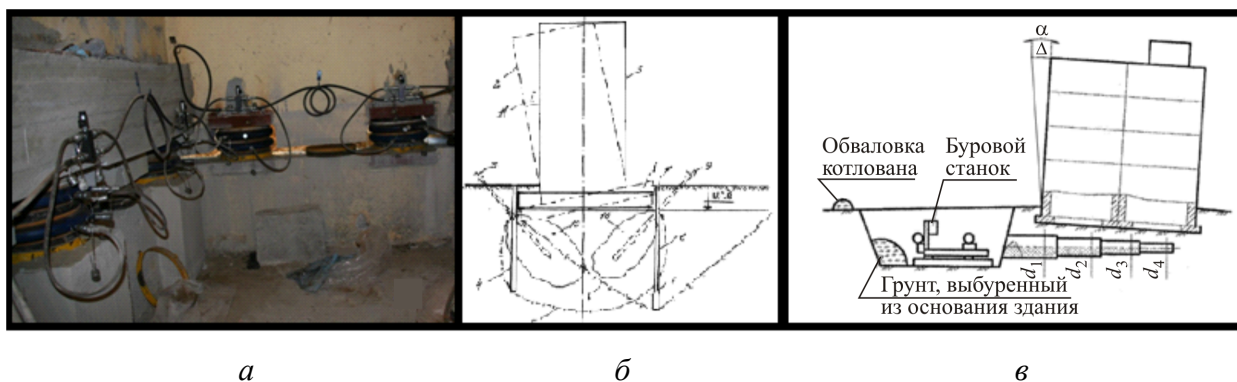


Рис. 1. Основные подходы к регулированию геометрического положения зданий:

*a* – подъем здания; *б* – выбуривание скважин; *в* – замачивание грунтов  
Fig. 1. The main approaches to regulating the geometric position of buildings:  
*a* – lifting the building; *b* – drilling wells; *c* – soaking the soil

В условиях основания, сложенного аллювиальными породами, одним из наиболее перспективных способов корректировки пространственного положения зданий и сооружений является метод выбуривания грунта из-под подошвы фундаментов, так как изменение характеристик грунтов в основании происходит лишь в месте удаления грунта, при этом горизонтальное бурение в условиях залегания слабых водонасыщенных грунтов имеет существенные недостатки, выражающиеся в сложности выполнения работ при высоком уровне грунтовых вод и обеспечении безопасных условий работ.

Принципиальным отличием в предлагаемом способе является устройство скважин, которые выполняются строго вертикально или с незначительным углом наклона.

Вертикальное бурение при выравнивании кренов зданий в условиях слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов имеет ряд преимуществ, а именно:

- возможность работы с уровня дневной поверхности;
- доступность техники для производства работ;
- относительная быстрота производства работ по снижению неравномерности осадки;
- высокая степень безопасности производства работ.

## Метод расчета

Методика выравнивания геометрического положения зданий и сооружений на плитных фундаментах основана на формировании дополнительных деформаций ослабленного грунтового массива, созданного бурением вертикальных скважин в активной зоне грунтового основания со стороны минимальных осадок (противоположных крену).

Разрушение грунта обусловлено развитием областей пластических деформаций вокруг выбуриваемой скважины [3, 4, 16, 17]. Факторами, влияющими на состояние скважин, являются: физико-механические характеристики основания, геометрия скважины и напряженное состояние в основании.

Таким образом, расчет основания с целью определения зон пластических деформаций будет существенно зависеть от положения скважины относительно фундамента и напряженного состояния грунтового массива.

Для постановки задачи рассмотрим возможные расчетные случаи расположения скважины относительно фундаментной плиты, при однородном грунтовом основании, без учета уровня грунтовых вод (рис. 2).

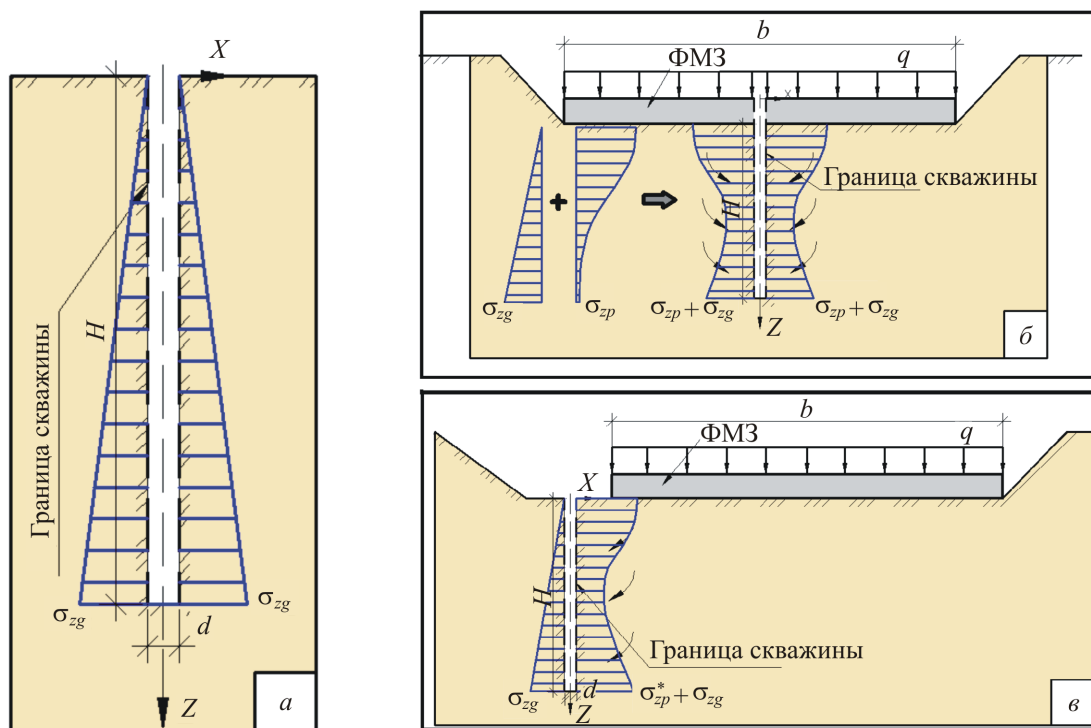


Рис. 2. Расчетные случаи расположения цилиндрической полости относительно фундамента:  
 а – одиночная скважина в грунте; б – скважина под плитой фундамента;  
 в – скважина вне контура фундамента

Fig. 2. Calculated cases of the cylindrical cavity relative to the foundation: a – a single well in the ground; b – a well under the foundation slab; c – a well outside the foundation contour

В настоящей работе рассматривается первый расчетный случай (рис. 2, а), когда скважина расположена в однородном массиве грунта, в котором присутствуют напряжения только от собственного веса грунта ( $\sigma_g$ ). Задача решается в осесимметричной постановке, по причине того, что рассматриваемая скважина в грунте условно является идеальной цилиндрической полостью, равномерно нагруженной по высоте скважины весом грунта.

Граничные условия задаются исходя из отсутствия влияния других факторов на напряженное состояние рассматриваемого массива грунта, за исключением напряжения от собственного веса.

Для определения напряженно-деформированного состояния грунта вокруг формируемой скважины используются соотношения, приведенные в работах З.Г. Тер-Мартirosяна [18], Г.Г. Болдырева [19] для определения НДС массива грунта при прессиометрических испытаниях:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma \cdot z \cdot \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right), \\ \sigma_\vartheta &= \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma \cdot z \cdot \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right), \\ u_r &= \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{r_0^2}{r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из выражения (1) возможно определить:  $u_r$  – перемещения стенки скважины, тангенциальные –  $\sigma_\theta$  и радиальные –  $\sigma_r$  напряжения, которые, в свою очередь, зависят от геометрии скважины и физико-механических свойств грунта.

Таким образом, подставляя определяемые напряжения в закон прочности, можно сформировать картину напряжений вокруг скважины.

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{(\sigma_r + \sigma_\theta + 2 \cdot C \cdot \operatorname{ctg}\varphi)}. \quad (2)$$

В работах А.П. Пулатова [20], В.П. Дыбы [17] и других исследователей установлено, что при бурении скважин в активной зоне грунтового основания эффект по снижению неравномерности осадки достигается при обрушении скважины в ходе возникновения и развития зон пластических деформаций грунта, поэтому основной задачей является определение факторов, влияющих на напряженное состояние грунта при формировании скважины.

Зададимся исходными данными для первого расчетного случая – одиночная скважина в однородном глинистом грунте. Диаметры скважин задаются из возможных размеров наиболее распространенных буровых установок  $d_{1...10} = 0,1 \dots 1$  м, глубину скважины в рассматриваемой задаче ограничиваем  $h = 20$  м. Характеристики грунта:

- ◆ удельный вес грунта  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>;
- ◆ модуль деформации  $E = 5$  МПа;
- ◆ удельное сцепление грунта  $c = 15$  кПа;
- ◆ угол внутреннего трения  $\varphi = 10^\circ$ .

#### Последовательность расчета:

1. Грунт вокруг скважины разбивается на элементарные слои по глубине с шагом 1 м.
2. Определяются перемещения, тангенциальные и радиальные напряжения из системы уравнений (1) в каждом элементарном слое на различном удалении от границы скважины.
3. Полученные напряжения подставляем в закон прочности (2). Условием появления областей предельного состояния грунта является превышение значений правой части формулы над левой.
4. По полученным радиусам зон предельного состояния в элементарном слое формируется картина (рис. 3) для всей скважины.

В указанной последовательности были определены зависимости радиуса зоны пластических деформаций от диаметра скважины в массиве грунта в условиях постоянных физико-механических характеристик грунтов, затем при постоянной геометрии скважины изменялось удельное сцепление в пределах от 5 до 25 кПа (рис. 4). На примере скважины  $d = 0,25$  м в однородном грунтовом массиве с характеристиками  $C = 15$  кПа,  $\varphi = 20^\circ$  построена картина развития зон пластических деформаций вокруг скважины (см. рис. 3). Установлено, что с глубины  $h = 8$  м радиус зоны пластических деформаций перестает увеличиваться, такой характер распространения зон пластических деформаций вокруг скважины установлен на всех исследуемых диаметрах скважин.

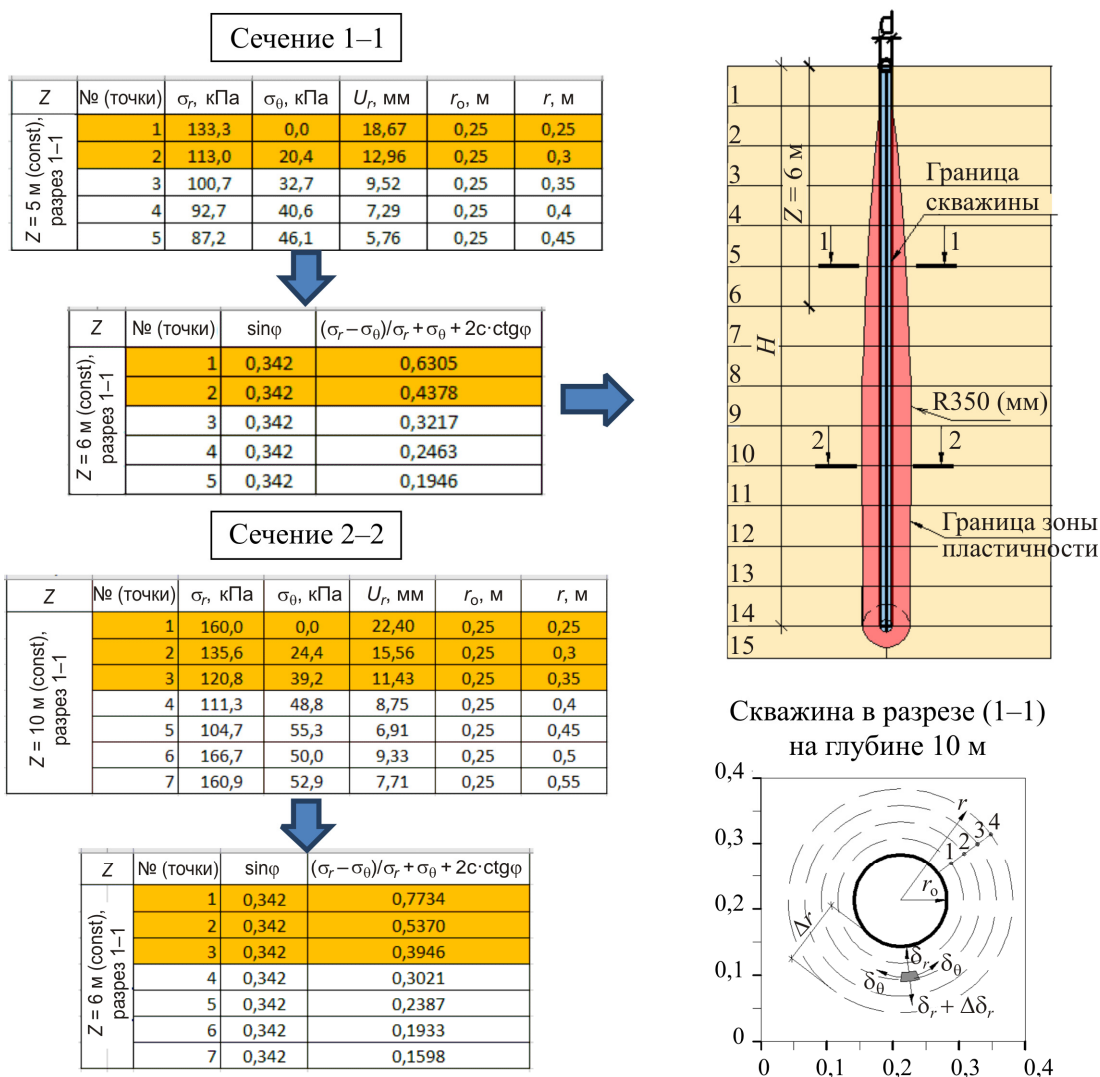


Рис. 3. Последовательность определения зон пластических деформаций на глубине  $z = 6$  м (при действии только собственного веса грунта)

Fig. 3. Sequence of determining zones of plastic deformation at a depth of  $z = 6$  м (when only the proper weight of the soil is applied)

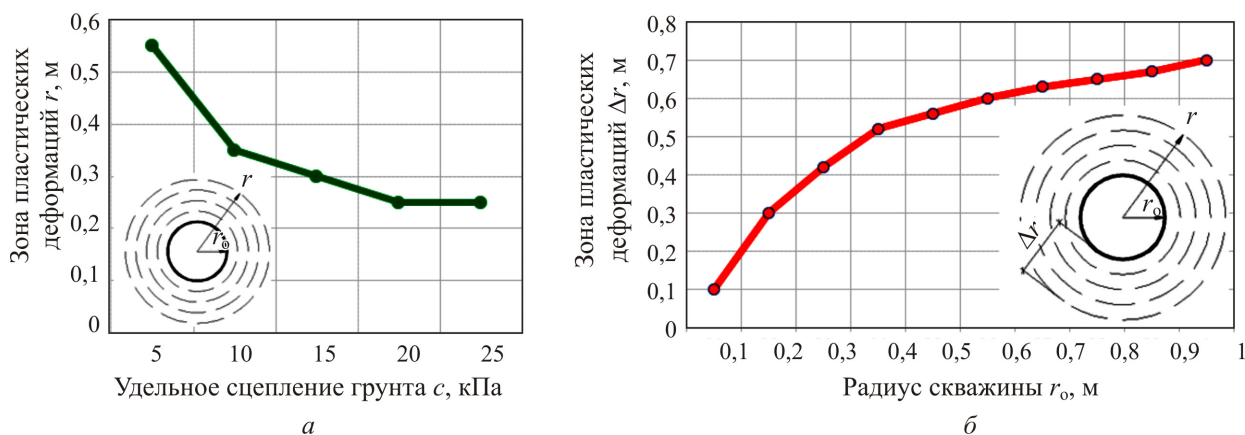


Рис. 4. Графики зависимости радиуса зоны пластических деформаций от удельного сцепления грунта (а) и диаметра скважины (б)

Fig. 4. Graphs of the dependence of the radius of the zone of plastic deformations on the specific adhesion of the soil (а) and the diameter of the well (б)

В результате выполненных расчетов установлено, что при скважине, например,  $d = 0,15$  м и глубиной  $h = 20$  м при увеличении удельного сцепления грунта с 5 до 25 кПа радиус зоны пластических деформаций  $r$  уменьшается с 0,55 до 0,25 м. При неизменных грунтовых условиях:  $c = 15$  кПа,  $\varphi = 20^\circ$  – определено влияние диаметра скважины  $d$ , м, на радиус зоны пластических деформаций  $\Delta r$ , м, а именно: с увеличением диаметра скважины с 0,1 до 1 м  $\Delta r$  возросло с 0,1 до 0,7 м.

## **Заключение**

Предложена методика определения зон пластических деформаций вокруг скважин в условиях действия собственного веса грунта как первого шага для определения параметров скважин в условиях разбуривания основания, для повышения его деформируемости. По представленной методике выполнены расчеты напряженного состояния грунта вокруг скважин, позволяющие устанавливать зоны разрушения грунта и тем самым определять параметры скважин и геометрию их расположения в зависимости от поставленных целей, при регулировании осадок плитных фундаментов.

## **Библиографический список**

1. Расчет устойчивости незакрепленной подземной выработки круглого сечения, расположенной в активной зоне заглубленного ленточного фундамента / А.Н. Богомолов, Д.В. Павлов, О.А. Богомолова, Л.А. Анисимов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – Вып. 40 (59). – С. 89–97.
2. Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р. Крены зданий, проблемы и пути решений // Сб. материалов 15-й науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов: в 2 т. – Тюмень, 2015. – С. 116–120.
3. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil / C. Guo, B. Sun, D. Hu [et al.] // Soil Mech Found Eng. – 2019. – Iss. 56. – P. 171–177.
4. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil / Guo Chengchao, Bo Sun, Dengping Hu, Fuming Wang, Mingsheng Shi, Xiaolong Li // Основания, фундаменты и механика грунтов [Онлайн]. 0.3 – 2019. – P. 12–16.
5. Оценка эффективности цементации песчаного грунта буроинъекционным методом с использованием искусственной нейронной сети / Shin Eun Chul, Jeong Jun Park, Jun Yu, Chittaranjan Patra // Основания, фундаменты и механика грунтов [Онлайн], 0.5 – 2018. – P. 8–13.
6. Технологические особенности устранения сверхнормативных кренов заблокированных зданий различной этажности / М.В. Зотов, И.А. Кутасов, М.Г. Скибин, А.А. Фириченко // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
7. Зотов М.В., Сорочан Е.А. Взаимодействие фундамента с грунтовым основанием при выравнивании здания домкратами // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – № 3. – С. 14–17.
8. Зотов М.В. Технология выравнивания многоэтажных зданий с помощью плоских домкратов: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов-н/Д, 2005. – 163 с.
9. Регулируемые фундаменты / М.Г. Скибин, С.П. Гусаренко, А.М. Зотов, М.В. Зотов // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2. – С. 139–142.

10. Устройство для корректировки положения здания, сооружения: патент РФ № 2209272 / Ю.К. Болотов, В.Д. Зотов, М.В. Зотов, Л.Н. Панасюк. Бюл. № 21 от 27.07.2002.
11. Сорочан Е.А., Ружков Е.М. Выправление крена дымовых труб путем организованной усадки грунтов основания // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1979. – № 1. – С. 16–18.
12. Burland J.B., Jamiolkowski M.B., Viggiani C. The stabilisation of the Leaning Tower of Pisa // *Soils and Foundations*. – 2003. – Vol. 43, iss. 5. – P. 63–80.
13. *Geotechnics and Heritage* / D.I. Harris, R.J. Mair, J.B. Burland, J.R. Standing. – London: CRC Press, 2017.
14. Ravaska O. A sheet pile wall design according to Eurocode 7 and Plaxis // *Numerical methods in geotechnical engineering*. – Paris: Presses de l'ENPC/LCPC. – 2002. – P. 649–654.
15. Tamez E., Ovando E., Santoyo E. Underexcavation of Mexico City's Metropolitan Cathedral and Sagrario Church // 14th Int. Conf. on SMFE, Hamburg, Germany. – 1997. – Vol. 4. – P. 2105–2126.
16. Влияние горизонтальной подземной выработки, ориентированной параллельно фронту однородного откоса, на его устойчивость / А.Н. Богомолов, Г.А. Абрамов, О.А. Богомолова, А.А. Пристансков, О.В. Ермаков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – № 1. – С. 82–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.08
17. Дыба В.П., Краснопольский И.И. Корректировка геометрического положения здания выбуриванием грунта из-под подошвы фундамента // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. – 2015. – Вып. 4 (40). – С. 1.
18. Тер-Мартirosян З.Г. *Механика грунтов: учеб. пособие*. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 552 с.
19. Болдырев Г.Г., Малышев М.В. *Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учеб. пособие*. – 4-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПГУАС, 2009. – 412 с.
20. Болотов Ю.К., Пулатов А.П. К вопросу исследований напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований в стадии выравнивания бескаркасных зданий методом выбуривания // *ВНИИПС Госстроя СССР*. – 1986. – Вып. 1. – С. 62–74.

## References

1. Bogomolov A.N., Pavlov D.V., Bogomolova O.A., Anisimov L.A. Raschet ustoychivosti nezakreplennoy podzemnoy vyrabotki kruglogo secheniya, raspolozhennoy v aktivnoy zone zaglublennogo lentochnogo fundamenta [Calculation of the stability of an unsecured underground excavation of circular cross section located in the active zone of a buried strip foundation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, iss. 40(59), pp. 89-97.
2. Pronozin Ya.A., Yepifantseva L.R. Kreny zdaniy, problemy i puti resheniy [Building rolls, problems and solutions]. *Sbornik materialov 15 nauchno prakticheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov, soiskateley i magistrantov v dvukh tomakh. g. Tyumen'*, 2015, pp. 116-120.
3. Guo, C., Sun, B., Hu, D. et al. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mech Found Eng*, 2019, iss. 56, pp. 171–177.
4. Guo Chengchao, Bo Sun, Dengping Hu, Fuming Wang, Mingsheng Shi, Xiaolong Li. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Basic, foundations and soil mechanics*, 2019, pp. 12-16.



5. Shin Eun Chul, Jeong Jun Park, Jun Yu, Chittaranjan Patra. Evaluation of the effectiveness of cementation of sandy soil using the injection method using an artificial neural network. *Basic, foundations and soil mechanics*, 2018, pp. 8-13.
6. Zotov M.V., Kutasov I.A., Skibin M.G., Firichenko A.A. Tekhnologicheskiye osobennosti ustraneniya sverkhnormativnykh krenov sblokirovannykh zdaniy razlichnoy etazhnosti [Technological features of eliminating excessive rolls of interlocked buildings of various floors]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2015, no. 3, pp. 11-14.
7. Zotov M.V., Sorochan Ye.A. Vzaimodeystviye fundamenta s gruntovym osnovaniyem pri vyravnivaniy zdaniya domkratami [The interaction of the foundation with the soil base when leveling the building with jacks]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2004, no. 3, pp. 14–17.
8. Zotov M.V. Tekhnologiya vyravnivaniya mnogoetazhnykh zdaniy s pomoshch'yu ploskikh domkratov [Leveling technology for multi-story buildings with flat jacks]. Ph. D. thesis. Rostov-na-Donu, 2005, 163 p.
9. Skibin M.G., Gusarenko S.P., Zotov A.M., Zotov M.V. Reguliruyemye fundamenty [Adjustable foundations]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2009, no. 2, pp. 139-142.
10. Bolotov Yu.K., Zotov V.D., Zotov M.V., Panasyuk L.N. Ustroystvo dlya korrektyrovki polozheniya zdaniya, sooruzheniya [Device for adjusting the position of a building, structure]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2209272 (2002).
11. Sorochan Ye.A., Ruzhkov Ye.M. Vypravleniye krena dymovykh trub putem organizovannoy usadki gruntov osnovaniya [Chimney roll straightening by organized shrinkage of base soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1979, no. 1, pp. 16- 18.
12. Burland J.B., Jamiolkowski M.B., Viggiani, C. The stabilisation of the Leaning Tower of Pisa. *Soils and Foundations*, 2003, vol. 43, iss. 5, pp. 63-80.
13. Burland J.R. et al. *Geotechnics and Heritage*. London, CRC Press, 2017.
14. Ravaska O. A sheet pile wall design according to Eurocode 7 and Plaxis. *Numerical methods in geotechnical engineering*, 2002, Paris, Presses de l'ENPC/LCPC, pp. 649–654.
15. Tamez E., Ovando E., Santoyo E. Underexcavation of Mexico City's Metropolitan Cathedral and Sagrario Church. *14th Int. Conf. on SMFE, Hamburg, Germany*, 1997, vol. 4, pp. 2105-2126.
16. Bogomolov A.N., Abramov G.A., Bogomolova O.A., Pristanskov A.A., Yermakov O.V. Vliyaniye gorizontallykh podzemnykh vyrabotki, oriyentirovannoy parallel'no frontu odnorodnogo otkosa, na yego ustoychivost' [The influence of horizontal underground tunnels, oriented parallel to the front of the uniform slope, on its stability]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, no. 1, pp. 82–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.08.
17. Dyba V. P., Krasnopol'skiy I. I. Korrektirovka geometricheskogo polozheniya zdaniya vyburivaniyem grunta iz-pod podoshvy fundamenta []. *Internet-vestnik VolgGASU*. 2015, iss. 4 (40), pp Correction of the geometric position of the building by drilling soil from under the base of the foundation. 1
18. Ter-Martirosyan, Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, ASV, 2009, 552 p.
19. Boldyrev G.G., Malyshev M.V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty (v voprosakh i otvetakh)* [Soil mechanics. Foundations and foundations (in questions and answers)]. 4<sup>th</sup> ed. Penza, PGUAS, 2009, 412 p.
20. Bolotov Yu.K., Pulatov A.P. K voprosu issledovaniy napryazhenno- deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh osnovaniy v stadii vyravnivaniya beskarkasnykh zdaniy metodom vyburivaniya [On the issue of studies of the stress-strain state of soil bases in the stage of leveling frameless buildings by drilling]. *VNIIPS Gosstroya SSSR*, 1986, iss. 1, no. 6274.