

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗНЫХ СИСТЕМ КРЕПЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

### АБДАЛЛАХ М.

Факультет гражданского строительства и инженерных методов охраны окружающей среды Кампуса Рафика Харири Ливанского университета, г. Дамур, Ливан  
abdallahma@rhu.edu.lb

### АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод статьи ливанской исследовательницы Мирват Абдаллах «Численное моделирование разных систем крепления глубоких котлованов» (Abdallah, 2017). Эта работа была опубликована в журнале *International Journal of Geological and Environmental Engineering* («Международном журнале по инженерной геологии и инженерным методам охраны окружающей среды») и находится в открытом доступе на сайте издательства WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology – «Всемирной академии наук, техники и технологий») по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет распространять, микшировать, адаптировать, переводить и использовать (даже в коммерческих целях) статьи при условии указания типов изменений и ссылок на первоисточники. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Abdallah, 2017) приведена в конце.

Строительство в городских условиях требует создания глубоких котлованов вблизи уже существующих зданий и сооружений. Необходимость этого повысилась для улучшения дальнейшего развития городских территорий, поскольку очень увеличилась численность населения. В Ливане некоторые городские районы сильно перенаселены, и там не хватает места для новых зданий и сооружений, что делает незаменимым использование подземного пространства. Автор переведенной работы (Abdallah, 2017) выполнила численное моделирование с использованием метода конечных элементов для изучения взаимодействий в системе «глубокий котлован – подпорная стенка – грунт – соседнее сооружение» в двумерной постановке при нелинейном поведении вмещающего грунта. Данное исследование сосредоточено на сравнении результатов, полученных с использованием двух разных систем крепления котлована. Кроме того, было проведено параметрическое исследование эффектов расстояния между котлованом и соседним сооружением.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

глубокий котлован; грунтовые анкеры; распорки; взаимодействие.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Абдаллах М. Численное моделирование разных систем крепления глубоких котлованов (пер. с англ.) // *Геоинфо*. 2023. Т. 5. № 7. С. 24–31  
DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-7-24-31

# NUMERICAL MODELING OF VARIOUS SUPPORT SYSTEMS TO STABILIZE DEEP EXCAVATIONS

**ABDALLAH M.**

Civil and Environmental Engineering Department, the Rafic Hariri Campus of the Lebanese University, Damour, Lebanon  
abdallahma@rhu.edu.lb

## ABSTRACT

We bring to the attention of the readers a slightly abridged and adapted translation of the paper “Numerical modeling of various support systems to stabilize deep excavations” by Mirvat Abdallah, a Lebanese researcher (Abdallah, 2017). This paper was published in the International Journal of Geological and Environmental Engineering. It is an open access article that is available on the website of the WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology) publisher under the CC BY 4.0 license that allows it to be copied, distributed, translated, adapted, modified, mixed and used for any purposes (even commercial ones) provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the reference to the original paper (Abdallah, 2017) is in the end.

Urban development requires deep excavations near buildings and other structures. Deep excavation has become more necessary for better utilization of space as the population of the world has dramatically increased. In Lebanon, some urban areas are very crowded and have lack spaces for new buildings and underground projects, which makes the usage of underground space indispensable. In the presented investigation, a numerical modeling was performed using the finite element method in 2D to study interactions in the system “deep excavation – diaphragm wall – soil – neighboring structure” in the case of nonlinear soil behavior. The study was focused on comparing the results obtained using various support systems (two ones). Furthermore, a parametric study was performed according to the distance between an excavation and a neighboring structure.

## KEYWORDS:

deep excavation; ground anchors; struts; interaction.

## FOR CITATION:

Abdallah M. Chislennoye modelirovaniye raznyh sistem krepleniya glubokih kotlovanov [Numerical modeling of various support systems to stabilize deep excavations] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2023. T. 5. № 7. S. 24–31 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-7-24-31 (in Rus.).

## Введение ►

Ливан – одна из небольших стран, население которых с годами очень сильно увеличивается. Поэтому в Бейруте, Сайде и других ливанских городах в настоящее время не хватает парковочных мест и складских помещений. Рост и развитие этих городов все чаще требуют использования подземных помещений, что часто вызывает необходимость создания глубоких котлованов вблизи существующих зданий и сооружений. Строительство котлованов вызывает смещения вмещающих грунтов и влияет на окружающую застройку. Поэтому для преодоления этой сложной проблемы первостепенное значение имеют исследования взаимодействия между системами крепления котлованов и вмещающими их грунтами.

На смещения грунтов и систем крепления котлованов влияют многие факторы [1–3]. Проектировщики могли бы

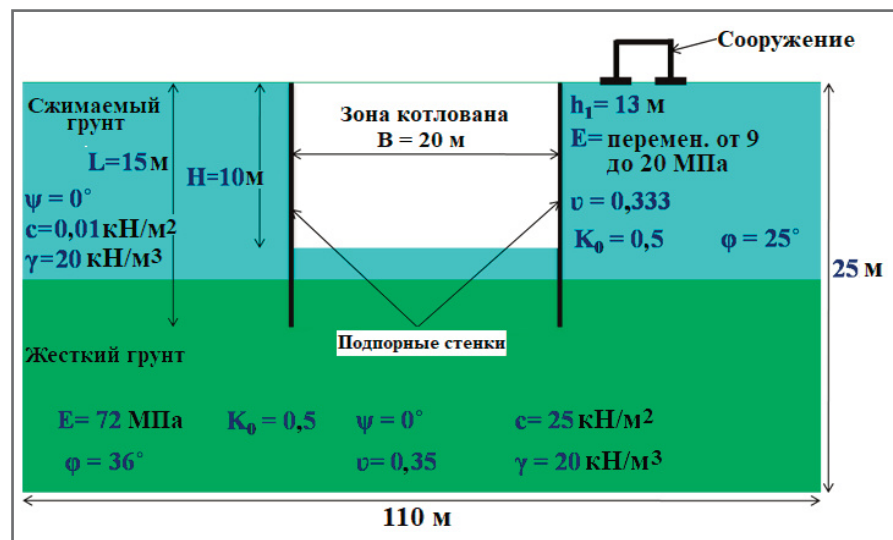


Рис. 1. Схематический вертикальный разрез котлована и вмещающего грунтового массива

контролировать некоторые из них, но, к сожалению, часть факторов зависит от реальных условий проведения работ.

## Численное моделирование ►

В данной статье представлены результаты изучения взаимодействий

между строительными конструкциями и грунтами в городских районах. В частности, фокусируется внимание на влиянии глубоких котлованов на эксплуатируемую окружающую застройку. Изучаемые взаимодействия часто встречаются в крупных городах из-за перегруженности городской инфраструктуры.

Было выполнено численное моделирование для общего анализа взаимодействий в системе «котлован – подпорная стенка – грунт – соседнее сооружение» на основе метода конечных элементов с учетом упругопластического поведения грунта и того, что модуль Юнга  $E$  слоя грунта 1 (рис. 1) увеличивается с глубиной в соответствии со следующей формулой:

$$E(z) = E_0(P_m/P_0)^{0,5},$$

где  $P_m$  – среднее напряжение на глубине  $z$ ;  $E_0$  – определяющий параметр, который соответствует модулю Юнга при среднем давлении  $P_m = P_0$ .

Эта формула учитывает изменения модуля Юнга в зависимости от среднего давления, которое увеличивается с глубиной из-за собственного веса грунта [4, 5].

Исследуемая строительная площадка сложена двумя слоями грунта (мощностью 13 и 12 м сверху вниз). Длина рассматриваемого участка составляет около 110 м, а глубина – около 25 м (см. рис. 1).

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов в 2D постановке с использованием программного пакета PLAXIS [6]. Использованная сетка конечных элементов показана на рисунке 2. Она содержит при-

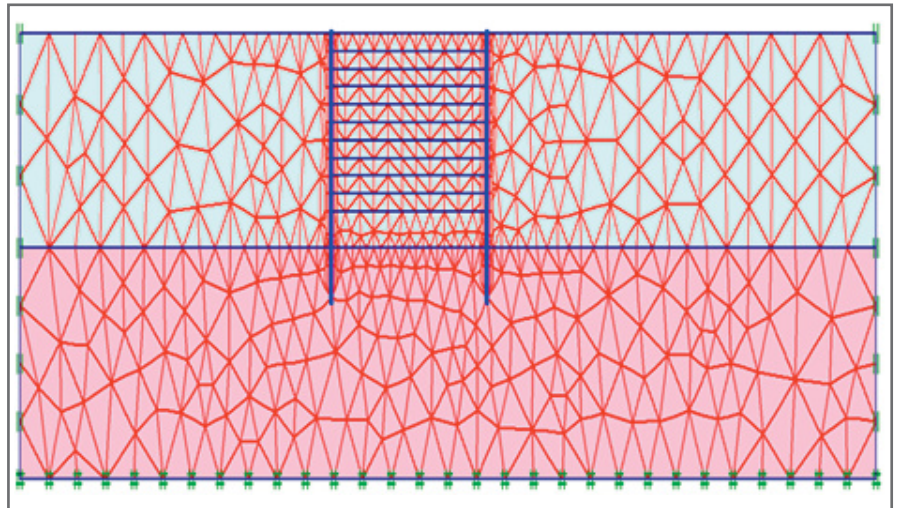


Рис. 2. Двумерная сетка конечных элементов [7]

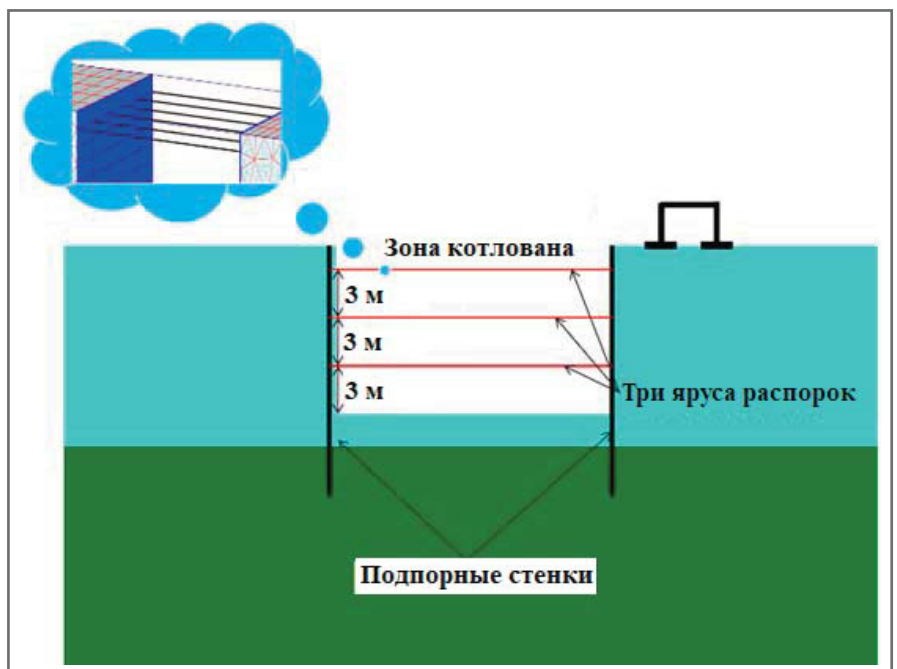


Рис. 3. Схематический вертикальный разрез котлована с системой горизонтальных распорок для поддержки подпорных стенок [7]

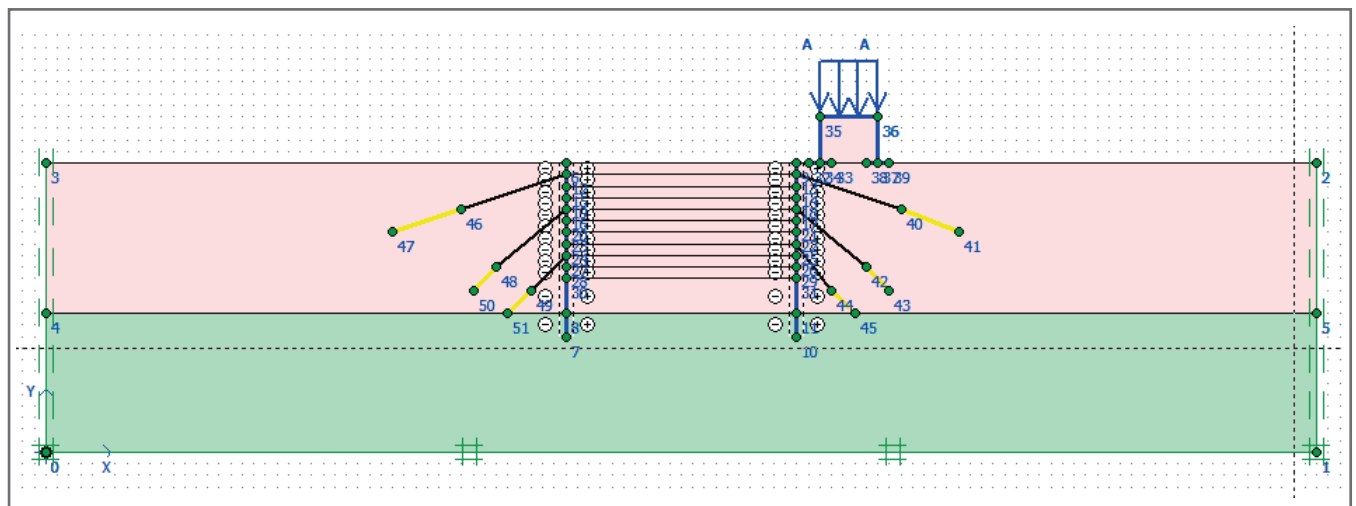


Рис. 4. Схематический вертикальный разрез котлована с системой грунтовых анкеров для поддержки подпорных стенок [7]



Рис. 5. Критическая круглоцилиндрическая поверхность скольжения

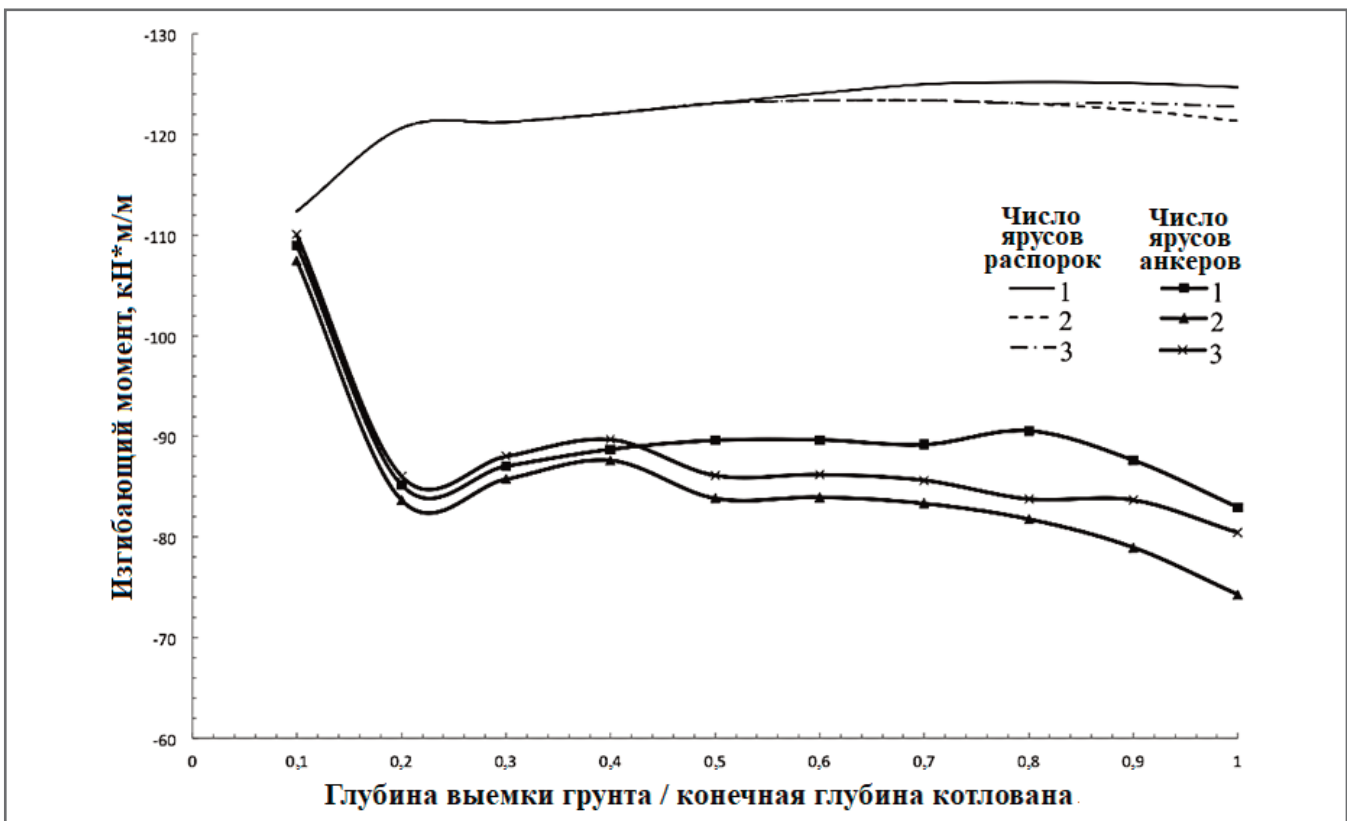


Рис. 6. Изменения изгибающего момента в середине пролета соседнего наземного сооружения при выемке грунта во время строительства котлована

близительно 900 треугольных 6-узловых элементов.

Моделирование вертикальной подпорной стенки выполнялось с помощью

балочных элементов с осевой жесткостью  $EA=1,7 \cdot 10^7$  кН и жесткостью при изгибе  $EI=3,542 \cdot 10^5$  кН\*м<sup>2</sup>. Для ограничения смещений подпорной

стенки использовались два варианта ее укрепления.

*Вариант 1. Временные горизонтальные распорки с нормальной жесткостью*

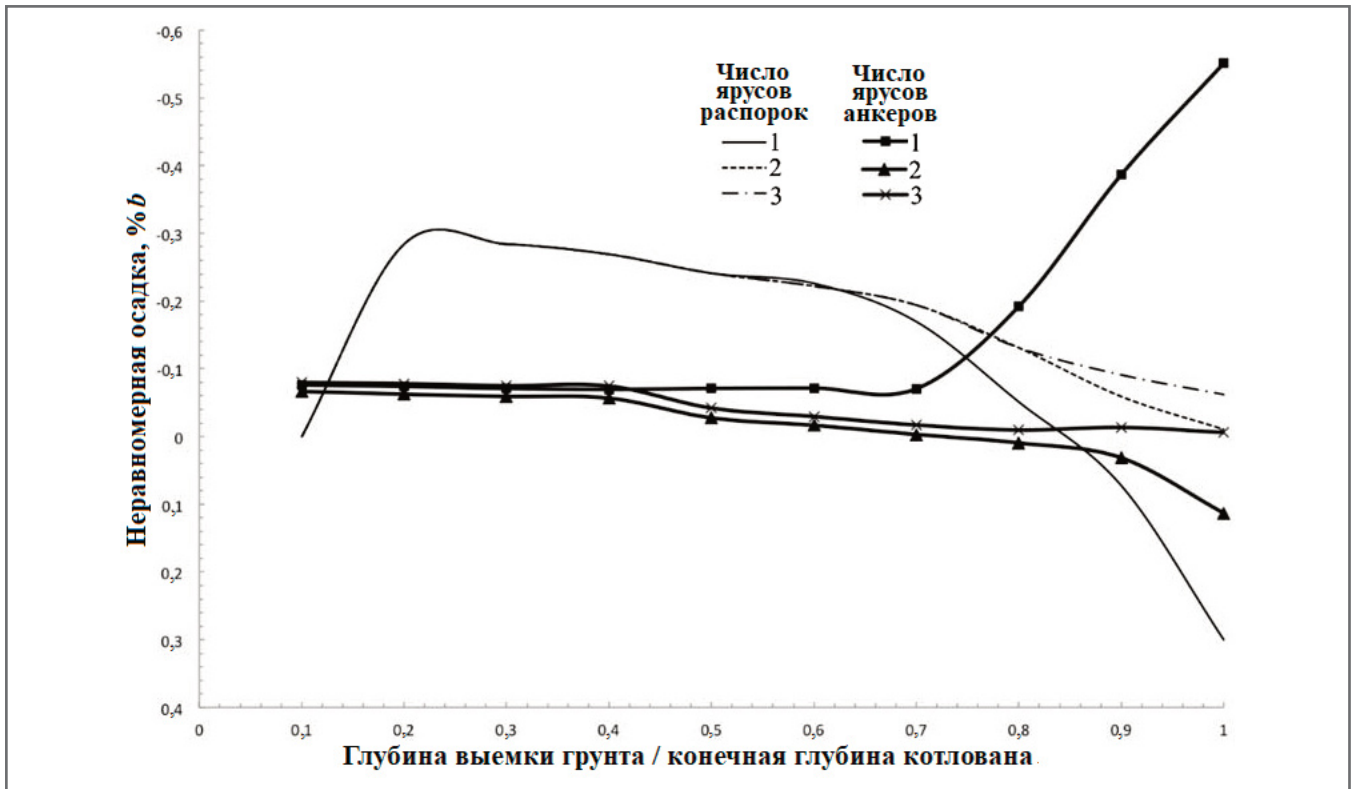


Рис. 7. Развитие неравномерной осадки соседнего наземного (или с неглубоким фундаментом) сооружения, вызванной выемкой грунта при строительстве котлована (под обозначением  $b$  автор, вероятно, имеет в виду ширину сооружения. – *Ред.*)

$EA=2 \cdot 10^6$  кН (рис. 3). Моделирование взаимодействий «подпорная стенка – грунт» требует использования конечных элементов нулевой толщины, которые могут учитывать два явления: скольжение или отрыв.

**Вариант 2. Постоянные грунтовые анкеры.** Такая система укрепления подпорной стенки позволяет проводить строительные работы в зоне вынутого грунта. Что касается свойств грунтовых анкеров, то необходимы два набора данных: по типу анкеров и по типу их размещения. Для стержня (тяги) анкера (между узлами) нормальная жесткость  $EA=2 \cdot 10^5$  кН, шаг составляет 2,5 м,  $F_{\max, \text{comp}}=1 \cdot 10^{15}$  кН,  $F_{\max, \text{tens}}=1 \cdot 10^{15}$  кН. Для корня анкера нормальная жесткость  $EA=1 \cdot 10^{15}$  кН/м (рис. 4). Расстояние между двумя последовательными ярусами анкеров в вертикальной плоскости равно 3 м.

Расположенное вблизи котлована наземное сооружение представляет собой раму высотой 4 м с пролетом 5 м, поддерживаемую двумя опорами шириной по 2 м при равномерной учитываемой нагрузке  $q_u=14,5$  кН/м<sup>2</sup> [7].

При анализе методом предельного равновесия требуется множество пробных поверхностей скольжения, чтобы найти критическую поверхность скольжения, соответствующую наименьшему значению коэффициента (запаса) устой-

чивости (рис. 5). После этого, а также для того, чтобы сделать глубокий котлован устойчивым при отсутствии или наличии расположенного рядом наземного сооружения, одним из предлагаемых решений является использование грунтовых анкеров. Можно учесть эффекты усиления грунта анкерами (см. рис. 4). Необходимы расчет усилия вытягивания (выдергивания), задание длины анкеровки, наклона осей анкеров и многих других параметров.

**Влияние количества ярусов временной и постоянной систем поддержки подпорных стенок**

Изменения изгибающего момента в середине пролета описанного выше наземного сооружения в конце выемки грунта из котлована (см. рис. 1) имеют более низкие значения (от 33 до 38%) при использовании для поддержки подпорных стенок системы грунтовых анкеров (рис. 6).

Что касается неравномерной осадки соседнего сооружения, то использование грунтовых анкеров (двух или трех ярусов) более эффективно для усиления подпорной стенки котлована, чем применение горизонтальных распорок. Причем при анкерном креплении максимальная неравномерная осадка достигается не в конце откопки котлована, а при выемке грунта на глубину 1 м и

потом уменьшается благодаря установке двух или трех ярусов грунтовых анкеров (рис. 7).

**Параметрические исследования**

Как показали параметрические исследования, горизонтальные смещения подпорной стенки уменьшаются при увеличении расстояния между котлованом и соседним сооружением. Эти исследования также показали, что максимальные смещения подпорной стенки при ее поддержке горизонтальными распорками происходят ближе к ее верхней части, а при укреплении грунтовыми анкерами – ближе к ее середине (рис. 8).

Максимальные изгибающие моменты подпорной стенки достигаются не на уровне дна котлована, а на глубине около 8 м. Причем они больше в случае применения грунтовых анкеров, а также при увеличении расстояния до соседнего сооружения (но лишь до определенного расстояния, начиная с которого максимальные изгибающие моменты начинают уменьшаться) (рис. 9).

Самые большие неравномерные осадки соседнего сооружения происходят при использовании системы горизонтальных распорок. При увеличении расстояния  $d$  между подпорной стенкой



Рис. 8. Изменения горизонтальных смещений подпорной стенки с глубиной при разных расстояниях ( $d$ ) между ней и соседним наземным сооружением

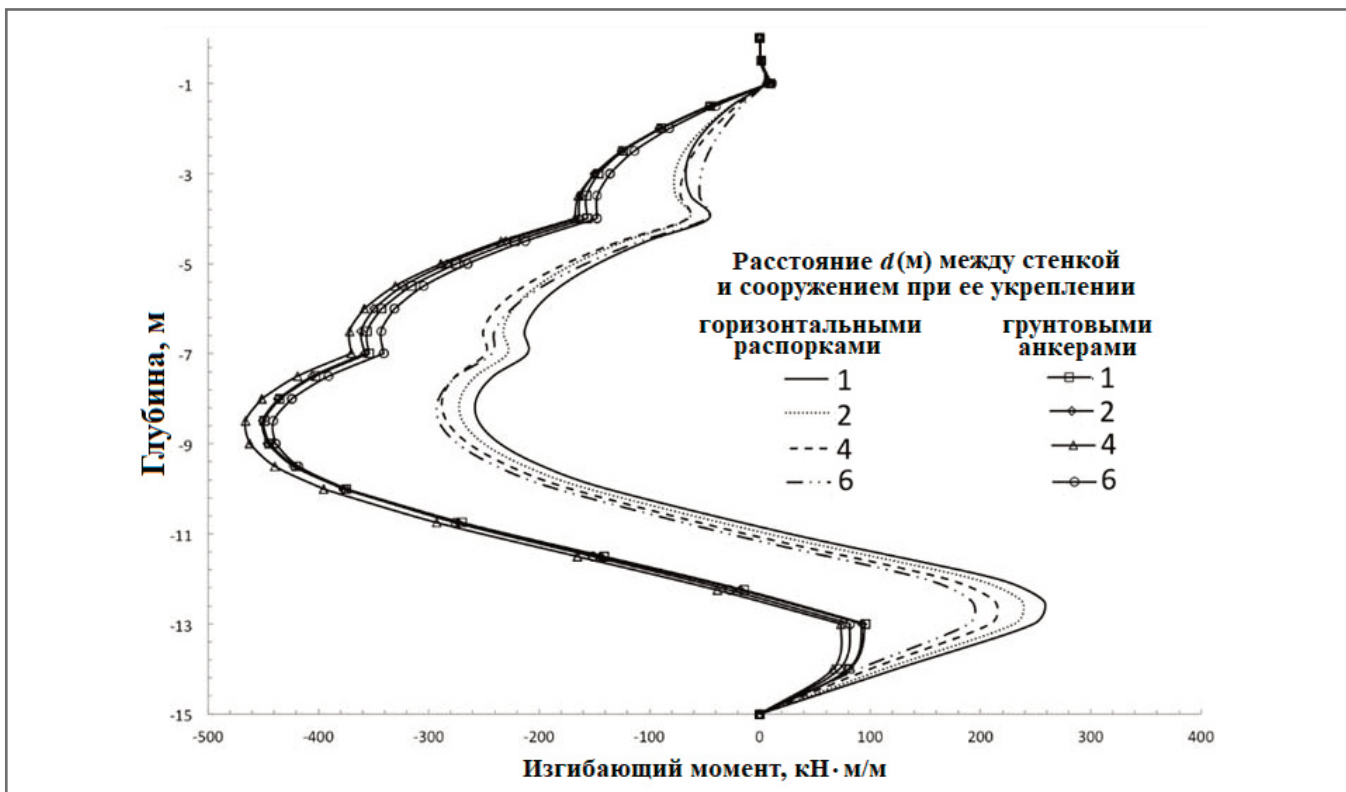


Рис. 9. Изменения изгибающего момента подпорной стенки с глубиной при разных расстояниях  $d$  между ней и соседним сооружением

и соседним сооружением они уменьшаются, причем достигаются при все большей глубине выемки грунта: при  $d=1$  м максимальная неравномерная осадка (около минус  $0,58\%b$ ) достигается при выемке на глубину 3 м, а при  $d=6$  м ее максимальное значение (около

минус  $0,27\%b$ ) достигается при выемке на глубину 10 м.

А когда для усиления подпорной стенки используются грунтовые анкеры, максимальное значение неравномерной осадки достигается при  $d=2$  м и начинает уменьшаться при увеличе-

нии  $d$ . Кроме того, максимальные неравномерные осадки в случае анкерного крепления всегда достигаются при выемке грунта на глубину 1 м, а потом уменьшаются за счет установки трех ярусов грунтовых анкеров (рис. 10).

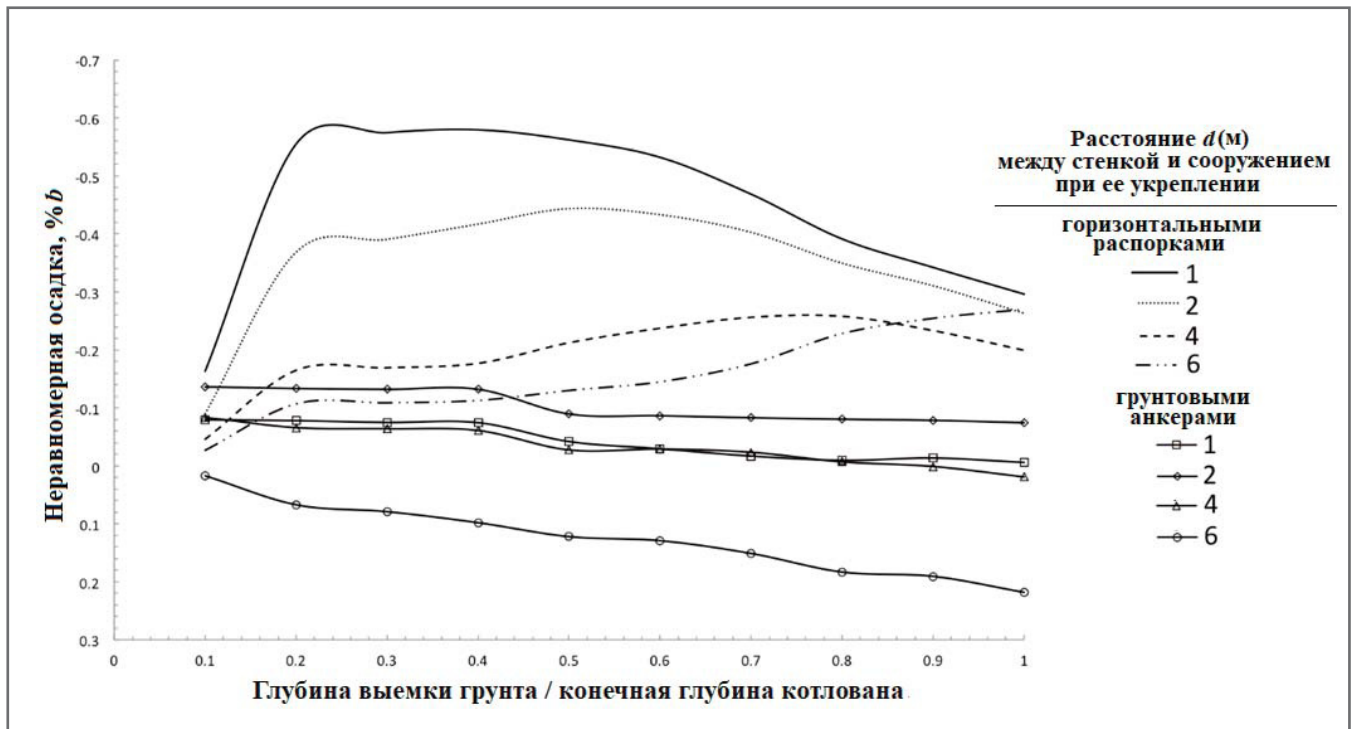


Рис. 10. Развитие неравномерных осадок соседнего сооружения (между его наземными или неглубоко заложенными опорами), вызванных выемкой грунта при строительстве котлована, при разных расстояниях  $d$  между сооружением и подпорной стенкой котлована (под обозначением  $b$  автор, вероятно, имеет в виду ширину сооружения. – *Ред.*)

**Заключение** ▶

Взаимодействия «котлован – подпорная стенка – грунт – соседнее сооружение» являются серьезной геотехнической проблемой, особенно в условиях плотной городской застройки.

В данной статье представлен численный анализ создания и поведения глубокого котлована с двумя разными системами крепления при наличии расположенного рядом сооружения. Также рассмотрено влияние расстояния между соседним сооружением и котлованом.

В статье продемонстрированы результаты конечноэлементного моделирования того, как влияет создание и наличие глубокого котлована на поведение вмещающего грунта и расположенного рядом наземного сооружения. Моделирование проводилось в двумерной постановке при нелинейном поведении грунта. Было обнаружено, что учет конструктивных элементов влияет на смещения грунта и подпорных стенок, вызванные выемкой грунта, и что откопка и наличие готового котлована вблизи существующего фундамента сильно влияют на смещения этого фундамента и, следовательно, опирающегося на него сооружения.

Полученные результаты показали, что необходимо усилить подпорные стенки котлована так, чтобы ограничить их смещения и, следовательно, деформации грунта за ними. При этом для сведения к минимуму воздействия земляных работ на вмещающий грунт и соседнее наземное сооружение, лучше использовать постоянные грунтовые анкеры (по сравнению с временными горизонтальными распорками).

Исследования также показали, что важно учитывать влияние расстояния между расположенным поблизости сооружением и котлованом при значительном воздействии горизонтальных смещений подпорной стенки, индуцированного момента в подпорной стенке и неравномерной осадке соседнего сооружения (между его опорами).

Данная работа требует продолжения. Необходимо выполнить следующее: рассмотреть учет взаимодействий «жид-

кость – скелет» в грунте и их влияния на усилия, возникающие в конструкциях; проанализировать поведение различных типов грунтов, встречающихся в Ливане, с целью выработки практических рекомендаций по расчетам и строительству котлованов и подземных сооружений в городах; провести экономическое исследование использования двух различных систем крепления подпорных стенок котлованов, которые были рассмотрены в данной статье. **И**

*Автор выражает благодарность Кампусу Рафика Харири Ливанского университета (г. Дамур, Ливан) за финансовую, академическую и техническую поддержку. Хотелось бы также поблагодарить Ливанский университет в целом и в частности профессора Фади Хаге Шехаде (Fadi Hage Chehade) за плодотворное сотрудничество и техническую поддержку. Особую благодарность хотелось бы выразить студенту автора – Самире Эль-Масри (Samir El Masri).*

**Источник для перевода** ▶

**(Source for the translation)** ▶

Abdallah M. Numerical modeling of various support systems to stabilize deep excavations // International Journal of Geological and Environmental Engineering. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2017. Vol. 11. № 7. DOI: doi.org/10.5281/zenodo.1131433. URL: publications.waset.org/10007537/numerical-modeling-of-various-support-systems-to-stabilize-deep-excavations; publications.waset.org/10007537/pdf.

**Список литературы, использованной автором переведенной статьи ▶****(References used by the author of the translated article) ▶**

1. Chehade F.H., Chehade W., Mroueh H. Shahrou I., Numerical finite element analysis of the behavior of structure near to deep excavations in urban area // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E). 2008. Vol. 2. № 2.
2. Hsieh P.-G., Ou C.-Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation // Can. Geotech. J. 1998. Vol. 35. P. 1004–1017.
3. Krajewski W., Edelman L., Plamitzer R. Ability and limits of numerical methods for the design of deep construction pits // Computers and Geotechnics. 2008. Vol. 28. P. 425–444.
4. Bayoumi A., Abdallah M., Hage Chehade F. non linear numerical modeling of the interaction twin tunnels-structure // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2016. Vol. 10. № 8.
5. Hage Chehade F., Shahrour I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. Vol. 23. № 2. P. 210–214.
6. Vermeer P.A., Brinkgreve R.B.J. PLAXIS finite element code for soil and rock analyses, version 7. Rotterdam: Balkema, 1998.
7. Abdallah M., Hage Chehade F., Chehade W., Fawaz A. Interaction deep excavation – adjacent structure: numerical two and three dimensional modeling // Advanced Materials Research. Switzerland: Trans Tech Publications, 2011. Vol. 324. P. 344–347. DOI: doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.324.344.

# Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

**С 2022 года журнал «ГеоИнфо»  
выходит в формате \*PDF.  
10 выпусков в год.**



# WWW.GEOINFO.RU