УДК 624.131

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-92-99

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech, Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КОТЛОВАНОВ

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR ENCLOSING PIT STRUCTURES

Выбор метода расчетов ограждающих конструкций котлованов является актуальным вопросом, так как от результатов расчетов зависят геометрические и механические параметры ограждений, применяемые конструктивно-технологические решения и сметная стоимость материалов и работ. В настоящее время при расчетах ограждающих конструкций котлованов применяются классические графоаналитические решения, полуаналитические программы и программные комплексы, использующие метод конечных элементов. У каждого метода есть свои предпосылки и допущения, в также достоинства и недостатки. Целью настоящей статьи является сравнительный анализ основных методов расчетов ограждающих конструкций котлованов с отображением их особенностей и граничных условий применения. Для этого были выполнены тестовые расчеты ограждения котлована методом упругой линии в программных комплексах SCAD и PLAXIS 2D. Также разработан и предложен упрощенный метод расчета ограждений котлованов, который может быть использован на предпроектной стадии строительства в качестве предварительного расчета или дополнительного проверочного расчета устойчивости, прочности и деформативности ограждающих конструкций котлованов.

Ключевые слова: устойчивость, прочность и деформативность ограждающих конструкций котлована, метод упругой линии, полуаналитический расчет, численное моделирование ограждающих конструкций котлована.

Choosing the calculation method for the enclosing excavation pit structures is an urgent issue, since the results of the calculations determine the selection of the geometric and mechanical parameters, as well as the estimated cost of materials and works. At present, at calculation of the enclosing structures of excavation pits, there are used classical semi-graphical solutions, semi-analytical programs and software packages based on the finite element method. Each method has its own prerequisites and assumptions, as well as advantages and disadvantages. The purpose of this article is presentation of comparative analysis results of the main methods for calculating the enclosing structures of excavation pits considering their features and boundary conditions of application. The author has performed test calculations of the excavation pit enclosing structures using the elastic line method in the SCAD and PLAXIS 2D software packages. The author has also developed and proposed a simplified method for calculating pit fences. This method can be used at the pre-project stage of construction in the form of preliminary calculation or as additional verification calculation of the stability, strength and deformability of pit enclosing structures.

Keywords: stability, strength and deformability of pit enclosing structures, elastic line method, semi-analytical calculation, numerical simulation of pit enclosing structures.

Введение

Подробные исследования о методах расчетов ограждающих конструкций котлованов и сравнительные оценки результатов расчетов приведены в научных исследованиях многих авторов [1–9]. Однако, несмотря на многочисленные ис-

следования в этой области, она безусловно является актуальной и в настоящее время в связи с уникальными особенностями инженерно-геологических, гидрогеологических условий различных площадок, выполнением подземного строительства в условиях плотной городской

застройки на тиксотропных чувствительных грунтах, большим разнообразием применяемых технологических и конструктивных решений по ограждению и раскреплению котлованов. В данной статье выполнен сравнительный анализ наиболее применяемых методов расчета ограждающих конструкций котлованов и отражены характерные особенности, преимущества и недостатки рассматриваемых решений.

1. Расчет ограждения котлована методом упругой линии

Графоаналитический метод упругой (гибкой) линии является классическим расчетом ограждающих конструкций котлованов. В процессе расчетов определяются эпюры активного и пассивного давлений грунта, строятся веревочные и силовые многоугольники, а также эпюра изгибающего момента в сечении ограждения. По результатам вычислений определяется требуемая глубина заделки ограждения ниже дна котлована из условия устойчивости грунта и подбирается сечение, класс материала (стали или бетона) ограждающей конструкции. Основными недостатками данного метода являются трудоемкость и длительность данного расчета, а также отсутствие рекомендаций по определению горизонтального перемещения ограждающей конструкции. На рис. 1 приведены результаты расчета тестовой задачи с расчетной схемой консольного ограждения, характеристиками грунтов, эпюрами активного и пассивного давлений, построением веревочного и силового многоугольников и эпюрой изгибающего момента в сечении ограждения.

2. Полуаналитический расчет ограждения котлована в программном комплексе SCAD

Программный комплекс (ПК) SCAD или идентичные ему аналоги (LIRA, ING+ и т. д.) служат для расчета строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения. Грунтовое основание в программах такого типа выражено достаточно упрощенно: применяются грунтовые модели, основанные на коэффициенте постели (модель Винклера — Фусса, Пастернака и т. д.). Однако правильно определив граничные условия, активное давление и жесткость ограждения, а также задав вместо пассивного отпора грунта коэффициент постели ниже дна котлована, можно получить достаточно точные

результаты. Основными недостатками данной расчетной схемы являются отсутствие расчета устойчивости грунтового массива и приближенные значения коэффициента постели, который в свою очередь дает приближенные результаты усилий и перемещений всей системы. На рис. 2 приведены результаты расчета тестовой задачи с расчетной схемой консольного ограждения, эпюрами моментов и поперечных сил, а также горизонтальное перемещение ограждающей конструкции.

3. Численное моделирование ограждения котлована в ПК PLAXIS 2D

Следует отметить, что определение активного и пассивного давлений без учета перемещений ограждающей конструкции (как приведено в разделах 1, 2) приводит к линейной зависимости между внешними давлениями, внутренними усилиями и горизонтальными перемещениями. Однако, как видно на рис. 3, внешние давления зависят от горизонтального перемещения ограждения, то есть расчет необходимо проводить по деформированной схеме. Такой расчет можно выполнить в специализированных программных комплексах, использующих метод конечных элементов, например с помощью ПК PLAXIS 2D. На рис. 4 приведены результаты расчета тестовой задачи консольного ограждения котлована с эпюрами моментов, поперечных сил и горизонтальным перемещением.

4. Упрощенный метод расчета ограждения котлована (УМ)

ПК PLAXIS 2D путем численного моделирования ограждающих конструкций котлована и грунтового массива действительно дает возможность применить различные модели грунтов, учесть разгрузку котлована при его откопке, предусмотреть последовательность, этапность разработки котлована, учесть влияние перемещений ограждения на внешние давления и внутренние усилия ограждения или, иначе говоря, выполнить расчет по деформированной схеме. Но при этом ПК PLAXIS 2D не определяет геометрические, механические и прочие параметры ограждающих конструкций котлованов, для этого необходимо выполнять дополнительные трудоемкие аналитические и полуаналитические расчеты (методом упругой линии или в программе SCAD). В технических регламентах и прочей

Рис. 1. Результаты расчетов ограждения методом упругой линии:
а — напластования грунтов котлована; б — расчетные характеристики грунтов; в — эпюры активного и пассивного давлений, кПа; г — веревочный и силовой многоугольники, кН; д — эпюра моментов

Рис. 2. Результаты расчетов ограждения в ПК SCAD:
а — активное давление грунта со стороны бровки котлована, кПа; б — эпюра моментов, кН·м; в — эпюра поперечных сил, кН; г — горизонтальное перемещение, м

Рис. 3. Изменение эпюр активного и пассивного давлений при горизонтальных перемещениях и подъеме дна котлована при откопке: а — расчетные активное и пассивное давления, определяемые по закону Кулона; б — фактические эпюры активного и пассивного давлений с учетом горизонтального перемещения ограждения и подъема дна котлована при разгрузке (откопке)

литературе также нет конкретных указаний по предварительному назначению глубины заделки ограждающей конструкции ниже дна котлована, выбору сечения и материала конструкций (класса стали и бетона) и т. д. Автор настоящей

Рис. 4. Результаты численного моделирования ограждения котлована в ПК PLAXIS 2D с эпюрами моментов, поперечных сил и горизонтальным перемещением ограждения

статьи разработан упрощенный метод по предварительному назначению основных геометрических и механических параметров ограждающих конструкций котлованов на основе выведенных из закономерностей по определению напряженно-деформированного состояния системы «ограждение котлована–грунтовой массив». На рис. 5 приведены расчетные схемы упрощенного метода. В разделах 4.1–4.11 приведены разработанные автором расчетные проверки по назначению геометрических и механических параметров ограждающих конструкций котлована и способов его раскрепления.

4.1. Назначение глубины заделки и общей длины металлического или железобетонного ограждения из условия устойчивости грунта

$$M_p > M_a; \quad (1)$$

$$M_p = \frac{2}{3} l_z \left[\frac{\gamma_{\text{осп}} l_z^2}{2} \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi_{\text{осп}}}{2} \right) + 2c_{\text{осп}} l_z \text{tg} \left(45 + \frac{\varphi_{\text{осп}}}{2} \right) \right]; \quad (2)$$

$$M_a = \frac{2}{3} \left(L + \frac{q}{\gamma_{\text{осп}}} \right) \left[\frac{\gamma_{\text{осп}} L^2}{2} \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_{\text{осп}}}{2} \right) - 2c_{\text{осп}} L \text{tg} \left(45 - \frac{\varphi_{\text{осп}}}{2} \right) + \frac{2c_{\text{осп}}^2}{\gamma_{\text{осп}}} \right], \quad (3)$$

где M_p — удерживающий момент от пассивного отпора грунта (плечо при трапецидальной эпюре равно $\frac{2}{3} l_z$ при треугольной эпюре — $\frac{1}{3} l_z$), кНм; M_a — опрокидывающий момент от активного давления грунта (плечо при трапецидальной эпюре равно $\frac{2}{3} \left(L + \frac{q}{\gamma_{\text{осп}}} \right)$, при треугольной эпюре — $\frac{1}{3} L$), кНм; l_z — глубина заделки ограждения ниже дна котлована, м; L — общая длина ограждения, м (оптимальное соотношение общей длины ограждения к глубине заделки ниже дна котлована: $L / l_z = 2 \dots 1,5$. В первом приближении глубина заделки ограждения принимается равной двум глубинам котлованов l_k , далее путем последовательных расчетов глубина заделки уточняется); q — внешняя нагрузка на бровку котлована, кН/м.

В расчетах определяются средневзвешенные значения прочностных характеристик грунтов в пределах действия пассивного (l_z) и активного моментов (L):

- осредненный удельный вес, кН/м³:

$$\gamma_{\text{осп}} = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sum h_i}; \quad (4)$$

- осредненный угол внутреннего трения, град.:

Рис. 5. Расчетные схемы для упрощенного метода расчета ограждающих конструкций котлованов: а — консольная схема ограждения при расчете на устойчивость; б — консольная схема ограждения с определением активного давления и расчетом на прочность и деформативность; в — расчетная схема вариантов раскрепления ограждения (в случае, если консольная схема ограждения не проходит какие-либо проверки)

$$\varphi_{\text{оср}} = \frac{\sum \varphi_i h_i}{\sum \varphi_i}; \quad (5)$$

• осредненное удельное сцепление, кПа:

$$c_{\text{оср}} = \frac{\sum c_i h_i}{\sum c_i}. \quad (6)$$

4.2. Назначение глубины заделки и общей длины металлического или железобетонного ограждения из условия защиты дна котлована от прорыва напорными водами (в водонасыщенных песках различной крупности)

$$l_z \gamma_{\text{оср}} > 1, 2 L_w \gamma_w, \quad (7)$$

где l_z — глубина заделки ограждения ниже дна котлована, м; $\gamma_{\text{оср}}$ — средневзвешенное значение удельного веса грунта от дна котлована до низа ограждения, кН/м³; L_w — максимальная высота напорного столба воды со стороны засыпки от уровня подземных вод до низа ограждения, м; γ_w — удельный вес воды, кН/м³.

4.3. Назначение глубины заделки и общей длины металлического или железобетонного ограждения из условия защиты дна котлована от суффозии при восходящей фильтрации (в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах)

$$I = 1, 2 \left(\frac{L_w - l_z}{l_z} \right) < 1, 0, \quad (8)$$

где I — действующий градиент восходящего потока воды в уровне дна котлована.

4.4. Определение расчетного давления на металлическое или железобетонное ограждение в уровне проектной отметки дна котлована

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \sigma_q + \sigma'_k = \\ &= q \left(\text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_{\text{оср}}}{2} \right) \right) + \gamma_{\text{оср}} l_k \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_{\text{оср}}}{2} \right), \quad (9) \end{aligned}$$

где q — внешняя нагрузка на бровку котлована, кПа; σ_q — активное давление в уровне бровки котлована от внешней нагрузки, кПа; σ'_k — активное давление в уровне дна котлована от грунтов, кПа; σ_k — суммарное активное давление в уровне дна котлована от внешней нагрузки и грунтов, кПа; l_k — глубина котлована, м.

В случае наличия в пределах глубины котлована тиксотропных чувствительных грунтов допускается определять расчетное давление в уровне дна котлована с учетом нарушения структуры грунтов по формуле

$$\sigma_{st} = q + \gamma_{\text{оср}} l_k. \quad (10)$$

4.5. Назначение сечения и расчетного сопротивления стали для металлического или железобетонного ограждения из условия прочности

Для металлического ограждения:

$$R_s W_s > \frac{(2\sigma_q + \sigma_k) l_k^2}{6}, \quad (11)$$

где R_s — расчетное сопротивление стали на растяжение, кПа; W_s — момент сопротивления попе-

речного сечения ограждения на 1 погонный метр по сортаменту, м³.

Для железобетонного ограждения:

$$R_s A_s (h - 2a) > \frac{(2\sigma_q + \sigma_k) l_k^2}{6}, \quad (12)$$

где R_s — расчетное сопротивление арматурной стали на растяжение, кПа; A_s — площадь сечения растянутой арматуры на 1 погонный метр ограждения, м²; h — толщина поперечного сечения на 1 погонный метр железобетонного ограждения, м; a — толщина защитного слоя бетона, м.

4.6. Назначение сечения и расчетного сопротивления стали из условия деформативности металлического или железобетонного ограждения

Для металлического или железобетонного ограждения:

$$EI > \frac{(11\sigma_q + 4\sigma_k) l_k^4}{12}, \quad (13)$$

где E — модуль упругости стали или приведенный модуль упругости железобетона (с учетом бетона и арматуры), кПа; I — момент инерции поперечного сечения ограждения на 1 погонный метр, м⁴.

4.7. Назначение расчетного сопротивления стали и сечения обвязочной стальной балки из условия прочности

$$R_s W_s > \frac{\sigma_i l_b^2}{8}, \quad (14)$$

где σ_i — расчетное давление на обвязочную балку, кПа; l_b — расчетная длина обвязочной балки вдоль ограждения (можно принять равной среднему шагу распорок вдоль ограждения), м.

4.8. Назначение сечения и расчетного сопротивления стали обвязочной железобетонной балки из условия прочности

$$R_s A_s (h - 2a) > \frac{\sigma_i l_b^2}{8}. \quad (15)$$

4.9. Назначение сечения, шага и количества стальных распорок по глубине котлована из условия устойчивости

$$\frac{\pi^2 EI}{l_r^2} > \frac{\left[\left(\frac{\sigma_q + \sigma_k}{2} \right) l_k \right] b_r}{n_r}, \quad (16)$$

где l_r — общая длина распорки, м; b_r — шаг распорок вдоль ограждения, м; n_r — количество распорок по глубине котлована, шт.

4.10. Назначение расчетного сопротивления стали, сечения, шага и количества стальных распорок по глубине котлована из условия прочности

$$R_s A_s > \frac{\left[\left(\frac{\sigma_q + \sigma_k}{2} \right) l_k \right] b_r}{n_r}, \quad (17)$$

где A_s — площадь поперечного сечения распорного элемента, м².

4.11. Назначение сечения, длины, шага и количества анкерных железобетонных свай по глубине котлована из условия несущей способности по грунту на выдергивание

$$f \pi d l_{an} > \frac{\left[\left(\frac{\sigma_q + \sigma_k}{2} \right) l_k \right] b_r}{n_r}, \quad (18)$$

где $f = 30 \dots 50$ кПа — осредненное трение грунта по боковой поверхности анкерной сваи (при условии расположения большей части длины анкерной сваи в грунтах с $E \leq 10$ МПа, для грунтов с более высокими прочностными свойствами $f = 50 \dots 100$ кПа); d — диаметр анкерной сваи, м; l_{an} — длина анкерной сваи, м; b_r , n_r — те же обозначения, что указаны для распорок, только применительно к анкерным сваям.

В таблице приведены результаты расчетов, выполненных различными методами на основе инженерно-геологических условий и строительной ситуации при откопке котлована, приведен-

Сравнительный анализ результатов расчетов

Параметр	1. Метод упругой линии	2. Расчет с помощью ПК SCAD	3. Расчет с помощью ПК Plaxis 2D	4. Упрощенный метод (УМ)
K_{st}	1,24	—	1,50	1,57
M_{max} , кН·м	304	243	248	222
Q_{max} , кН	—	121	99	117
f_{max} , М	—	0,06	0,07	0,08

ных на рис. 1. Как видно из таблицы, все методы дают приблизительно одинаковые результаты усилий и перемещений и могут быть использованы при расчетах ограждающих конструкций котлованов.

Заключение

1. Графоаналитический расчет методом упругой линии является самым трудозатратным по времени, однако каждому профессиональному геотехнику необходимо владеть основными принципами этого расчета, так как он дает понимание основных закономерностей механики грунтов, а также оснований и фундаментов. Существенным ограничением этого метода является отсутствие возможности расчета и учета влияния горизонтальных перемещений ограждения на результирующие значения внешних давлений и внутренних усилий в конструкции.

2. Полуаналитический метод расчета в ПК SCAD является наглядным достоверным решением, но в этом методе используются простейшие линейные модели грунта: Винклера–Фусса или Пастернака, что не позволяет, например, рассчитать устойчивость ограждающей конструкции или выполнить расчет по деформированной схеме.

3. Численное моделирование ограждения в ПК PLAXIS является наиболее достоверным, так как в нем учитывается изменение напряженно-деформированного состояния системы на каждом этапе (при разработке котлована и его разгрузке, распределении внешних нагрузок при строительном и эксплуатационном периодах и т. д.). Кроме того, только в программе PLAXIS учитывается влияние перемещений ограждения и подъема дна котлована на распределение активного, пассивного давлений и внутренних усилий (расчет по деформированной схеме).

4. Несмотря на высокую достоверность численных расчетов в ПК типа PLAXIS, следует отметить, что при численном моделировании отсутствуют конкретные указания по конструированию и подбору основных геометрических и механических параметров ограждающих конструкций котлованов. В связи с этим упрощенный метод, разработанный автором статьи, позволяет предварительно назначить основные геометрические и механические параметры ограждающих конструкций с возможными спо-

собами их раскрепления и последующим численным моделированием сложного напряженно-деформированного состояния системы «ограждение котлована–грунтовой массив».

Библиографический список

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2016. 1031 с.
2. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.; СПб.: АСВ, 2016. 256 с.
3. Конюшков В. В., Владимирова Е. И. Анализ и прогноз устойчивости склона в природном состоянии, на строительный и эксплуатационный периоды // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 107–113.
4. Ильичев В. А., Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 17–20.
5. Конюшков В. В., Пятница А. В. Численное моделирование вариантного проектирования инженерной защиты территории от склоновых процессов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 100–105.
6. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. Освоение подземного пространства городов. М.: АСВ, 2017. 510 с.
7. Шулятьев О. А., Минаков Д. К. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2017. № 3 (8). С. 41–50.
8. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Сапин Д. А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 47–54.
9. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства / под ред. д-ра техн. наук, проф. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2017. 160 с.

References

1. Il'ichev V. A., et al. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnical engineering. Bases, foundations and underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2016, 1031 p.
2. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* [Design

and construction of underground structures in open pits]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2016, 256 p.

3. Konyushkov V. V., Vladimirova E. I. *Analiz i prognoz ustoychivosti sklona v prirodnom sostoyanii, na stroitel'nyy i ekspluatatsionnyy periody* [Analysis and forecasting of the slope stability in natural conditions for construction and operation periods]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 107–113.

4. Il'ichev V. A., Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Opyt osvoeniya podzemnogo prostranstva rossiyskikh megapolisov* [Experience in the development of underground space of Russian megacities]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov – Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2012, no. 2, pp. 17–20.

5. Konyushkov V. V., Pyatnitsa A. V. *Chislennoe modelirovanie variantnogo proektirovaniya inzhenernoy zashchity territorii ot sklonovykh protsessov* [Numerical simulation of the alternative design of territory engineering protection measures against landslide processes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2 (67), pp. 100–105.

6. Shulyat'ev O. A., Mozgachyova, Pospheov V. S. *Osvoenie podzemnogo prostranstva gorodov* [Development

of underground space of the cities]. Moscow, ASV Publ., 2017, 510 p.

7. Shulyat'ev O. A., Minakov D. K. *Tekhnologicheskie osadki pri ustroystve steny v grunte transheynogo tipa* [Technological settlement at construction of a diaphragm type wall]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2017, no. 3 (8), pp. 41–50.

8. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., Sapin D. A. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya pristroitel'stve i rekonstruktsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Engineering and geotechnical investigations in the reconstruction and new construction in conditions of dense urban development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 5, pp. 47–54.

9. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.