

## Расчет на устойчивость грунтоцементного ограждения котлована

В.П. Дыба<sup>1</sup>, Ю.А. Орлова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет  
(Новочеркасский Политехнический институт) г. Новочеркасск

<sup>2</sup>АО «Мосинжпроект» г. Москва

**Аннотация:** Развивается метод расчета грунтоцементного ограждения котлована по первому предельному состоянию. Предлагается метод расчета котлована на устойчивость (Ultimate Limit States) и, соответственно, расчета предельной глубины котлована. Построение статически допустимого поля напряжений в треугольном, с вертикальной гранью jet-массиве, которое получается с помощью модифицированного приближенного метода сложения В.В. Соколовского, в части сложения предельного состояния весомого клина, среда которого обладает внутренним трением и сцеплением, с предельным состоянием весомого клина, среда которого обладает внутренним трением и нулевым сцеплением. В результате чего получается предельное состояние весомого клина с пониженными прочностными характеристиками. Полученное решение является основой для определения максимально возможной глубины устойчивого котлована.

**Ключевые слова:** грунтоцемент, струйная цементация, прочностные характеристики, напряженно деформированное состояние грунтового основания, допустимые поля напряжений, устойчивость ограждения котлована, плоская деформация, предельная нагрузка, внешняя нагрузка, приближенный метод.

### 1. Прочность грунтоцементного ограждения котлована

Рост объемов и масштабов подземного строительства в крупных городах наблюдается во всем мире. Он обусловлен постоянно возрастающей численностью населения в таких городах, и как следствие строительством новых линий метрополитена. Сложность и высокая ответственность такого сооружения оказывает существенное влияние на строительство в условиях тесной городской застройки.

Одной из современных технологий, находящей все более широкое применение при строительстве городских тоннелей, при решении задачи по ограждению бортов котлована является технология струйной цементации грунтов (Jet-grouting). Наиболее распространена двухкомпонентная технология Jet-2 сооружения грунтоцементных свай, она предусматривает, размыв грунта струями цементного раствора в искусственном воздушном

потоке с гидравлическим выносом размытого грунта, с образованием в грунте скважины, заполняемой грунтоцементным раствором[1].

Как, например, производилось закрепление стенок котлована вестибюля № 1 станции «Окружная» Люблинско-Дмитровский линии Московского метрополитена. Этот участок грунтового основания представлен флювиогляциальными песками мелкими (ИГЭ-11), Физико-механические свойства грунтов приведены в таблице 1.

При устройстве свай основные технологические параметры, такие как давление нагнетания и скорость подъема монитора оставались неизменными на протяжении всего времени закрепления бортов котлована. Технологические параметры устройства грунтоцементных свай указаны в таблице 2.

Таблица № 1

Сравнительная таблица показателей физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ	Наименование грунта	Расчетные показатели		
		Плотность грунта, гр./м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения	Сцепление, кПа
11	Песок пылеватый, с прослоями песка мелкого, водонасыщенный	1,85	31	2

Таблица № 2

Технологические параметры устройства грунтоцементных свай

Давление P, атм	В:Ц	Расход цемента, кг./п.м.	Диаметр свай, мм
400	1,0	475,7	800

Для определения прочности грунтоцемента, были отобраны образцы из тела свай в виде цилиндрических кернов. Испытания образцов на прочность

при одноосном сжатии проводились на специальном прессе. Были получены следующие результаты испытания: ИГЭ-11 – 2,83 МПа [9].

## 2. Построение статически допустимых полей напряжений в Jet-массиве

Потеря устойчивости котлована (рис.1) может наступить в случае:

- а) опрокидывания или поворота jet-массива;
- б) сдвига jet-массива по своей подошве;
- в) разрушения jet-массива из-за недостаточных прочностных характеристик.



Рис. 1. – Котлован с закрепленными стенками и дном

Первые два случая не представляют трудностей для расчета на основе использования для jet-массива модели абсолютно твердого тела, нагруженного активным давлением грунта [2,3].

Разрушение jet-массива рассчитать сложнее. Очевидная неоднородность, изменчивость прочностных характеристик, размытость геометрических границ уменьшает надежность расчета закрепленного массива на разрушение. Несмотря на обычно высокое удельное сцепление среды jet-массива от 1 до 10 МПа и более, авторы статьи считают, что задача расчета его разрушения имеет смысл по экономическим соображениям для jet-массива с пониженными прочностными характеристиками или с периодическими ослабленными участками или, наконец, в случае малых значений угла  $\alpha$  (рис.2).

Сложившийся подход к расчету грунтовых оснований по предельным состояниям предполагает вычисление полей напряжений и деформаций в процессе возрастания нагрузки и времени, т.е. требуется описание истории изменения напряженно деформированного состояния (НДС) грунтового основания. Считается, что это можно сделать с использованием современных моделей грунта (физических уравнений) и конечно элементного метода решения соответствующих краевых задач. При этом предельную нагрузку пытаются определить по обрушению процесса численных вычислений. Но предельную нагрузку можно оценить и без описания истории изменения НДС в основании методами предельного анализа. Более того, оценку можно получить, не пользуясь «реальными» полями напряжений и деформаций и историей их изменений при предельных нагрузках [4-7].

Предлагается метод расчета котлована на устойчивость (Ultimate Limit States) и, соответственно, расчета предельной глубины котлована. Рассматривается плоская деформация. Моделью грунта является жесткопластическая среда с условием прочности Кулона-Мора.

Согласно предельному анализу пластических тел любому построенному статически допустимому полю напряжений в теле соответствуют внешние нагрузки, не превышающие предельных нагрузок. К таким полям относятся и предельные поля напряжений, в том числе, конечно, и соответствующие пониженным прочностным характеристикам.

Построим статически допустимое поле напряжений в треугольном, с вертикальной гранью jet-массиве, которое получим с помощью модифицированного приближенного метода сложения В.В. Соколовского [8]. Будем складывать предельное состояние весоного клина, среда которого обладает внутренним трением и сцеплением, с предельным состоянием весоного клина, среда которого обладает внутренним трением и нулевым сцеплением. В результате получим

---

предельное состояние весоного (с удвоенным удельным весом грунта, следовательно, при нахождении слагаемых удельный вес грунта принимается вдвое меньшим) клина с пониженными прочностными характеристиками (рис.2). Полученное решение и будем использовать для определения максимально возможной глубины устойчивого котлована с заданной формой (углом  $\alpha$  при вершине) и с заданными прочностными характеристиками jet-массива.

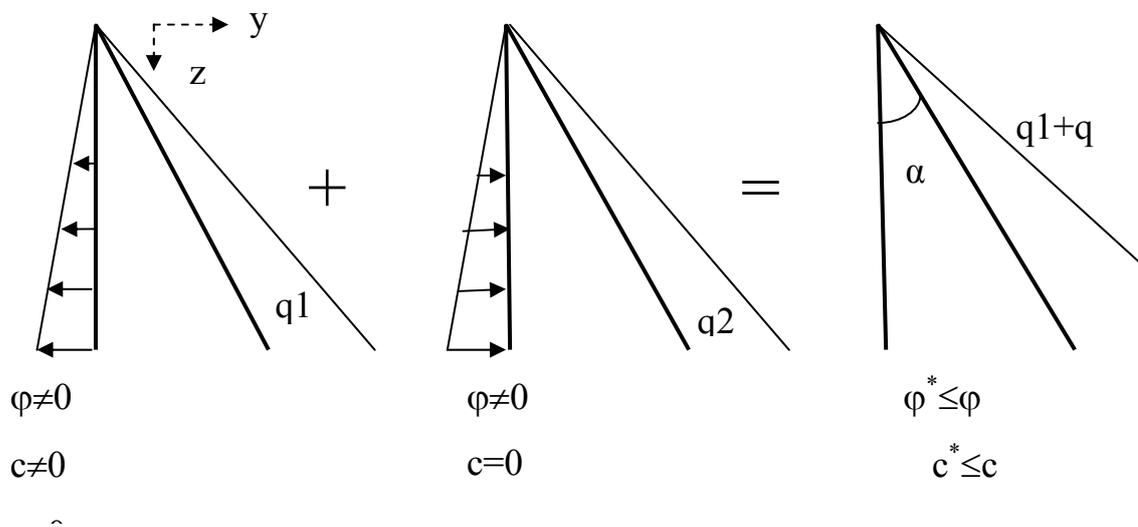


Рис. 2. – Метод сложения предельных состояний

В весоном связном клине выбираем следующее предельное напряженное состояние:

$$\sigma_1 = \sigma_y = \frac{\gamma}{\lambda} z, \text{ (растягивающие);}$$

$$\sigma_2 = \sigma_x = \gamma z - C; \tau_{yz} = 0. \tag{1}$$

Тогда на наклонной плоскости jet-массива, граничащей с грунтовой средой, появится поверхностная нагрузка  $q_1$ , складывающаяся из нормальных и касательных напряжений на этой плоскости (2).

$$\sigma_n = \left( \frac{1+\lambda}{2\lambda} + \frac{1-\lambda}{2\lambda} \cos 2\alpha \right) \gamma z + (\cos 2\alpha - 1) \frac{C}{2},$$

$$\tau_{ns} = \frac{1-A}{2A} \gamma \sin 2\alpha \cdot z + \frac{c}{2} \sin 2\alpha. \quad (2)$$

Заметим, что напряжения (1) удовлетворяет условию прочности Кулона-Мора:

$$\sigma_3 = -C + A\sigma_1,$$

где  $C = 2c_m \frac{\cos \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$ ,  $A = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$ ,  $c_m$  – удельное сцепление,  $\varphi_m$  – угол внутреннего трения.

В *весомом несвязном клине* распределение предельных напряжений найдем численным методом.

В результате решения определяются поверхностные силы  $q_2$ .

После сложения найденных предельных решений (рис.2) получим предельное распределение напряжений в клине с ослабленными прочностными характеристиками, с вертикальной ненагруженной стенкой (котлована). На наклонную плоскость клина, граничащую с грунтовой средой, действуют поверхностные силы  $q_1+q_2$ .

Расчет на несущую способность jet-массива сводится к сравнению активного давления со стороны грунтовой среды и нагрузки  $q_1+q_2$ .

Пусть глубина котлована  $h$ . Найдем результирующую силу и момент от распределенных сил  $q_1+q_2$  в интервале глубин от нуля до  $h$ . Если полученная главная сила и главный момент будут больше соответственно силы и момента от действия ограждаемого грунта, находящегося в активном предельном состоянии, то котлован не потеряет устойчивость.

### **3. Примеры расчета предельной глубины котлована с устойчивым грунтоцементным ограждением**

В расчетах объемный вес среды jet-массива принят величиной 20 кН/м<sup>3</sup>. Угол внутреннего трения среды jet-массива выбран величиной в 30°. Форма jet-массива определяется углом  $\alpha$ , который принимал два значения.

Рассмотрены три варианта степени закрепления грунта, которое выражается величиной сцепления. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица № 3

Предельные глубины котлованов

$\alpha$	Сцепление, кПа	Глубина котлована, м
30°	100	6
30°	200	11
30°	300	16
40°	100	12
40°	200	24
40°	300	35

Проанализировав результаты расчетов можно сделать вывод, что при правильно подобранных параметрах цементации грунтового массива можно проектировать конструкцию котлована с минимальным объемом распорной системы. Что в свою очередь упрощает строительно-монтажные работы в глубоких котлованах и способствует ускорению и удешевлению строительства [9,10].

**Литература**

1. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. - Пермь: 2007. 226с.
2. Ильичев В.А., Готман Ю.А. Расчет размеров грунтоцементного массива по контуру котлована для снижения перемещения ограждения до требуемых величин методом оптимального проектирования. - М: 2011. с. 16-21.
3. Ильичев В.А. Городские подземные сооружения гражданского и общественного назначения. - СПб: 1998. с. 17-22.
4. Brooks, NJ. & Spence, J.F. Design and recorded performance of a secant retaining wall in Croydon. Proc. Int. Conf. Retaining Structures, Cambridge: 1992. pp. 152-158.

5. Дыба В.П. Оценки несущей способности фундаментов. - Новочеркасск: Южно-Российский гос. технический ун-т: 2008. 201 с.
6. Дыба В.П., Дыба П.В. Предельная «треугольная» нагрузка на несвязное основание. - Новочеркасск: Южно-Российский гос. технический ун-т: 2012. с. 23-28.
7. Zege S.O., Broyd I.I. Technological features of Underground Structure's Design executed by Jet-Grouting Technology: 2009. pp. 102-109.
8. Соколовский В.В. О приближенном приеме в статике сыпучей среды. ПММ, т. 16, вып. 2: 1952. с. 530-537.
9. Плешко М.С., Насонов А.А., Гармонин Р.Э., Сироткин А.Ю. Элементы геотехнического мониторинга подземных сооружений, закрепленных железобетонными анкерами // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196).
10. Плешко М.С., Армейсков В.Н., Петренко Л.А., Сулименко Р.И. О проблеме применения технологии струйной цементации при строительстве глубоких подземных котлованов // Инженерный вестник Дона, 2016, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3523](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3523).

### References

1. Malinin A.G. Strujnaja cementacija gruntov [Jet-Grouting for soil improvement]. Perm': 2007. 226 p.
2. Il'ichev V.A., Gotman Ju.A. Raschet razmerov gruntocementnogo massiva po konturu kotlovana dlja snizhenija peremeshhenija ograzhdenija do trebuemyh velichin metodom optimal'nogo proektirovanija [Calculation of Dimensions of Soil Improvement Zone around pit to decrease movements of walls within required limits, using Method of Optimal Design]. M: 2011. pp. 16-21.

3. Il'ichev V.A. Gorodskie podzemnye sooruzhenija grazhdanskogo i obshhestvennogo naznachenija [Urban underground structures civil and public buildings]. SPb: 1998. pp. 17-22.
4. Brooks, NJ. & Spence, J.F. Design and recorded performance of a secant retaining wall in Croydon. Proc. Int. Conf. Retaining Structures, Cambridge: 1992. pp. 152-158.
5. Dyba V.P. Ocenki nesushhej sposobnosti fundamentov [Evaluation of Foundations's Bearing Capacity]. Novocherkassk: Juzhno-Rossijskij gos. tehničeskij un-t: 2008. 201 p.
6. Dyba V.P., Dyba P.V. Predel'naja «treugol'naja» nagruzka na nesvjaznoe osnovanie [Ultimate “TRIANGULAR” load for Independent Foundation]. Novocherkassk: Juzhno-Rossijskij gos. tehničeskij un-t: 2012. pp. 23-28.
7. Zege S.O., Broyd I.I. Technological features of Underground Structure's Design executed by Jet-Grouting Technology: 2009. pp. 102-109.
8. Sokolovskij V.V. O priblizhennom prieme v statike sypuchej sredy [Preliminary Static analyses for Loosed Soils]. PMM, t. 16, vyp. 2: 1952. pp. 530-537.
9. Pleshko M.S., Nasonov A.A., Garmonin R.Je., Sirotkin A.Ju. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196).
10. Pleshko M.S., Armejskov V.N., Petrenko L.A., Sulimenko R.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3523](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3523).